



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PASI KANGAS
PUTKISILLAN SUUNNITTELUPROSESSI

Diplomityö

Tarkastaja: professorit Tero Juuti &
Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. toukokuuta 2016

TIIVISTELMÄ

Kangas, Pasi: Putkisillan suunnitteluprosessi
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 53 sivua, 23 liitesivua
Huhtikuu 2016
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Koneiden ja järjestelmien suunnittelu
Tarkastaja: professorit Tero Juuti & Asko Ellman

Avainsanat: teräsrakenne, putkisilta, suunnittelu, lujuuslaskentamalli, työohje

Tämän työn tavoitteena oli tutkia sekä tarkastella putkisillan suunnitteluprosessia sekä ja löytää keino teräsrakennemallin siirtämiselle tehdasmallinnusohjelma PDMS:stä lujuuslaskentaohjelma Finngen:in. Siirtämisestä sekä ohjelmien käyttämisestä tuli kirjoittaa ohje, jota seuraamalla saa käsityksen ohjelmien peruskäyttämiseen. Mallin siirtämiseen oli vaihtoehtoina tehdä makro-ohjelma tai muokata jo olevaa makroa tai löytää tallennusformaatti, jota molemmat ohjelmat lukevat.

Työn alussa vaihtoehto makron tekeminen/muokkaaminen jätettiin diplomityön ulkopuolelle aikataulullisesti huomattavasti suurempitöisenä vaihtoehtona. Tämän jälkeen keskityttiin ohjelmien välisen yhteisen tallennusformaatin löytämiseen. Ohjelmien tarjoajien ohjekirjoista selvisi, että tallennus tapahtuisi SDNF-formaattiin, joka saataisiin PDMS-mallista käyttämällä maksullista lisäohjelmaa OpenSteel:iä.

Diplomityön tuloksena on putkisillan suunnitteluprosessin läpikäyminen, sekä selkeä ja helposti seurattava ohje, jota seuraamalla suunnittelija pystyy luomaan teräsrakennemallin PDMS:llä ja Finngen:llä, sekä luomaan mallista SDNF-formaatin tiedoton OpenSteel:llä.

ABSTRACT

Kangas, Pasi: Pipe bridge design process
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 53 pages, 23 Appendix pages
April 2016
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
Major: Design of machine and systems
Examiner: Professors Tero Juuti & Asko Ellman

Keywords: steel structure, pipe bridge, designing, structural analysis model, work instructions

The aim of this thesis was to study and examine the design process of pipe bridges, as well investigate and find a way to transfer steel structure model from plant modeling software PDMS to strength calculation program Finnngen. This thesis included writing instructions from this transfer and the use of programs. By following these instructions, the basic use of programs should be clear. The options for the transfer were to make a macro program or to edit an existing macro or to find a saving format for the file, that both programs could read.

In the beginning of the project, option of making or editing a macro was excluded from the thesis, for being more time consuming alternative. After this the focus was aimed in finding a common saving format. From the program providers manuals was found, that the saving of the file would be in SDNF-format. The SDNF-file could be made from the PDMS-model using an additional fee program called OpenSteel.

As a result of this thesis, is going through the design process of pipe bridges and a clear and easy to follow instructions for the designer. Following the instructions, designer is able to create a steel structural model with PDMS and with Finnngen, as well as to create SDNF format file from the model with OpenSteel.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Sweco:n Porin toimistolla. Työn aiheeksi kehkeytyi putkisillan suunnitteluprosessin tarkastelu, sekä teräsrakenteiden tietojen siirtäminen laitosmallinnusohjelma PDMS:stä lujuuslaskentaohjelma Finngen:iin. Näistä ohjelmista, sekä tietojen siirtämisestä tuli kirjoittaa ohje, jota voitaisiin käyttää tarvittaessa putkisiltojen suunnittelun apuna. Työssä käydään läpi myös putkisillan suunnitteluun liittyviä standardeja.

Haluan kiittää Sweco Porin toimiston väkeä työn ohjauksesta sekä opastuksesta, sekä myös työni tarkastaneita professoreita Tero Juutia ja Asko Ellmania työn opastamisesta.

Porissa 06.05.2016

Pasi Kangas

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Työn tavoitteet.....	1
1.2	Putkisilta.....	1
1.3	Yritysesittely	2
2.	PUTKISILLAN SUUNNITTELUPROSESSI	4
3.	STANDARDIT PUTKISILLAN SUUNNITTELUSSA	6
3.1	Suomessa käytettävät standardit.....	6
3.1.1	Eurokoodiohjelma.....	6
3.1.2	Suomen rakentamismääräyskokoelma	6
3.2	Putkisillan suunnitteluun liittyvät standardit.....	7
3.3	SFS-EN standardien käyttö putkisillan suunnittelussa	7
3.3.1	SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet.....	8
3.3.2	SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.....	11
3.3.3	SFS-EN 1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuorma	18
3.3.4	SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat	20
3.3.5	SFS-EN 1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu.	27
3.4	Suomen rakentamismääräyskokoelman standardit.....	35
3.4.1	B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräykset	35
3.4.2	B7: Teräsrakenteet, ohjeet	38
4.	KÄYTETYT OHJELMAT	49
4.1	AVEVA.....	49
4.1.1	PDMS	49
4.1.2	OpenSteel	50
4.2	FEMdata.....	51
4.2.1	Finngen.....	51
4.2.2	Finnsap	51
5.	YHTEENVETO.....	52
	LÄHTEET	53
	LIITTEET	
	ESIMERKKIRAKENTEEEN LUONTI	54
	PDMS-mallin luominen	54
	OpenSteel:n käyttäminen	64
	Finngen:ssä muokkaaminen sekä Finnsap laskenta.....	67
	Finndraw jälkikäsittely.....	73

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: Putkisilta [1]</i>	<i>2</i>
<i>Taulukko 1: Kuormien mitoitusarvot EQU rajatilassa (SFS EN-1990 s.88).....</i>	<i>9</i>
<i>Taulukko 2: Rakenteen seuraamusluokan määrittäminen (SFS EN-1990 s.136)</i>	<i>10</i>
<i>Taulukko 3: Rakenteen kuormakerroin (SFS EN-1990 s.138).....</i>	<i>10</i>
<i>Taulukko 4: Kuormayhdistelmien kertoimet</i>	<i>10</i>
<i>Taulukko 5: Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin Ψ_0.....</i>	<i>11</i>
<i>Taulukko 6: Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS EN-1993-1-1 s.45).....</i>	<i>13</i>
<i>Taulukko 7: Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS EN-1993-1-1 s.46).....</i>	<i>14</i>
<i>Taulukko 8: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät.....</i>	<i>15</i>
<i>Taulukko 9: Nurjahduskäyrän valinta poikkileikkauksesta riippuen (SFS-EN 1993-1-1 s. 64).....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 2: Nurjahduskäyrät (SFS-EN 1993-1-1 s. 64))</i>	<i>17</i>
<i>Taulukko 10: Eri maastotyyppien yhteydessä käytettävät tuulensuojaisuuskerroinille suositeltavat arvot (SFS-EN 1991-1-3 s. 28).....</i>	<i>18</i>
<i>Taulukko 11: Esimerkitapaukset luomikuorman mitoitusilanteille sekä näiden kuormituskaaviot (SFS-EN 1991-1-3 s. 48).....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 3 : Ruotsin ja Suomen lumikuorma merenpinnan korkeudella (SFS-EN 1993-1-1 s. 64).....</i>	<i>20</i>
<i>Taulukko 12: Maastoluokat ja maastoparametrit (SFS-EN 1991-1-4 s. 36).....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 4: Terävasärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen voimakerroin c_f, 0, kun vapaan pään ohittava virtaus jätetään huomiotta (SFS-EN 1991-1-4 s. 114).....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 5: Pienennyskerroin ψ_r neliöpoikkileikkaukselle, jonka särmät on pyöristetty (SFS-EN 1991-1-4 s. 114).....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 6: Päätevaikutuskertoimen ψ_λ suuntaa-antavia arvoja tehollisen hoikkeuden λ funktiona eheyssuhteen ϕ eri arvoilla. (SFS-EN 1991-1-4 s. 140).....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 7: Eheyssuhde ϕ (SFS-EN 1991-1-4 s. 140).....</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 8: Voimakerroin c_f, 0 terävasärmäisistä sauvoista muodostetulle taseoristikkorakenteelle eheyssuhteen ϕ funktiona (SFS-EN 1991-1-4 s. 132).....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 9: Voimakerroin c_f, 0 terävasärmäisistä sauvoista muodostetulle avaruusristikkorakenteelle eheyssuhteen ϕ funktiona (SFS-EN 1991-1-4 s. 132).....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 10: Voimakerroin c_f, 0 pyöreistä sauvoista muodostetulle taso- ja avaruusristikkorakenteelle (SFS-EN 1991-1-4 s. 134)</i>	<i>27</i>

<i>Taulukko 13: Pyöreiden ja suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten paarrasauvojen välisten hitsausliitosten pätevyysrajat (SFS-EN 1993-1-8 s. 127).....</i>	<i>30</i>
<i>Taulukko 14: lisäehdot taulukon 16 käyttöön (SFS-EN 1993-1-8 s. 128).....</i>	<i>31</i>
<i>Taulukko 15: Neliön muotoisten rakenneputkien välisten hitsattujen liitosten aksiaalisten kestävyysienmitoitussarvot (SFS-EN 1993-1-8 s. 128-129)</i>	<i>32</i>
<i>Taulukko 16: Suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten paarrasauvojen välisten hitsattujen T-, X- ja Y-liitosten aksiaalisten kestävyysien mitoitussarvot (SFS-EN 1993-1-8 s. 130).....</i>	<i>33</i>
<i>Taulukko 17: Suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten paarrasauvojen välisten hitsattujen K- ja N-liitosten aksiaalisten kestävyysien mitoitussarvot (SFS-EN 1993-1-8 s. 131).....</i>	<i>34</i>
<i>Taulukko 18: Kuormien osavarmuuskertoimet murtorajatarkastelussa (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 4).....</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 11: Kattojen peruslumikuormat sk (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 8)</i>	<i>37</i>
<i>Taulukko 19: Nopeuspaine eri maastoluokissa (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 10).....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 12: Nopeuspaine eri maastoluokissa (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 10).....</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 20: Rakenneluokat (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 3).....</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 21: Taipumien käyttörajatilat (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 9).....</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 13: Poikkileikkausluokkien rajajoikkuudet (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 11).....</i>	<i>41</i>
<i>Taulukko 22: Nurjahdusluokkien pituudet (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 18).....</i>	<i>43</i>
<i>Taulukko 23: Nurjahdusluokat ja termi α (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 16).....</i>	<i>43</i>
<i>Taulukko 24: Nurjahdusluokkia (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 17).....</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 14: Tehollinen poikkileikkaus Ac, rasituksena keskeinen puristus (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 22).....</i>	<i>45</i>
<i>Taulukko 25: Sauvan poikkileikkauksen kestävyys voimasuureyhdistelmille poikkileikkausluokissa 1 ja 2 (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 13).....</i>	<i>46</i>
<i>Taulukko 26: Leikkauslujuuden ominaisarvo f_{vk} (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 23).....</i>	<i>46</i>

<i>Taulukko 27: Aineosavarmuusluvut ym (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 32).</i>	47
<i>Taulukko 28: Ominaisväsymisrajat (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 33).</i>	48
<i>Kuva 15. PDMS:stä löytyvät tilat.</i>	50
<i>Kuva 16. Rakennepuu</i>	55
<i>Kuva 17. Teräsprofiiliin hakeminen</i>	55
<i>Kuva 18. Teräsprofiilin valinta</i>	56
<i>Kuva 19. Suoran elementin luominen</i>	57
<i>Kuva 20. Elementin aloituspisteen anto</i>	57
<i>Taulukko 29. Mallin ensimmäiset elementit</i>	58
<i>Kuva 21. Rakenteen elementtimalli</i>	59
<i>Kuva 22. Valmis elementtimalli</i>	60
<i>Kuva 23. Profiilien valinta malliin</i>	61
<i>Kuva 24. Palkkien risteymäkohta aluksi</i>	62
<i>Kuva 25. Palkin pidentäminen</i>	62
<i>Kuva 26. Connect työkalun käyttö</i>	63
<i>Kuva 27. Palkkien risteymäkohta oikeellisemmin</i>	64
<i>Kuva 28. OpenSteel-työkalu</i>	64
<i>Kuva 29. OpenSteel Export-työkalu</i>	65
<i>Kuva 30. Export target information-ikkuna</i>	66
<i>Kuva 31. Export information-ikkuna</i>	67
<i>Kuva 32. Solmulisätiedot – valintaikkuna</i>	69
<i>Kuva 33. Valintatyökaluja</i>	70
<i>Kuva 34. Solmun kuormitus</i>	71
<i>Kuva 35. Elementtilisätiedot</i>	72
<i>Kuva 36. Viivakuorma</i>	72
<i>Kuva 37. Viivakuormitus esimerkki tapauksessa</i>	73
<i>Kuva 38: Tulosten tarkastelemisen pikatyökalu</i>	74
<i>Kuva 39: Siirtymä/kiertymä työkalu</i>	74
<i>Kuva 40: Siirtymäkuva liioitelluilla siirtymillä</i>	75
<i>Kuva 41: Palkkikuvien luonti työkalu</i>	76

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DRAFT	AVEVA:n ”mallista piirustukseksi” työkalu
Finngen	FEMdata:n valmistama teräsrakenteen mallinnusohjelma
Finnsap	FEMdata:n valmistama lujuuslaskentaohjelma
Finndraw	FEMdata:n FEM tulosten graafinen jälkikäsittelyohjelma
GRF	Tiedostopääte/tiedosto jonka Finngen tuottaa ja voidaan lukea Finnsap:iin
HVAC	Heating, ventilating and air conditioning katso kohta LVI
LVI	Lämmitys, vesi ja ilmastointi
PDMS	Plant Design Management Software, AVEVA:n valmistama tehtaiden mallinnus- ja suunnitteluohjelma
PML	Makro-ohjelmointi kieli
Q ATT	PDMS komentoikkunan komento jolla saadaan selvitettyä elementille tai profiilille annetut attribuutit.
SDNF	Steel Detailing Natural File- formaatti jolla voidaan siirtää 3D-mallin tiedot ohjelmasta toiseen.
Spref	PDMS komentoikkunan komento, jolla voidaan asettaa elementille profiili.
XML	Makro-ohjelmointi kieli

1. JOHDANTO

Teräsrakenteiden, tässä tapauksessa putkisiltojen, suunnittelussa tulee huomioida rakenteeseen vaikuttavat kuormitukset sekä niistä aiheutuvat mahdolliset ongelmat. Tätä varten on kehitetty monia lujuuslaskentaohjelmia, joiden avulla voidaan tarkastella kuormitusten vaikutusta mallinnettuun rakenteeseen. Eräs näistä lujuuslaskentaohjelmista on suomalainen Finngen. Tässä luvussa on kerrottu työn tavoitteet, sekä luvun lopussa kohdeyrityksen yritysesittely.

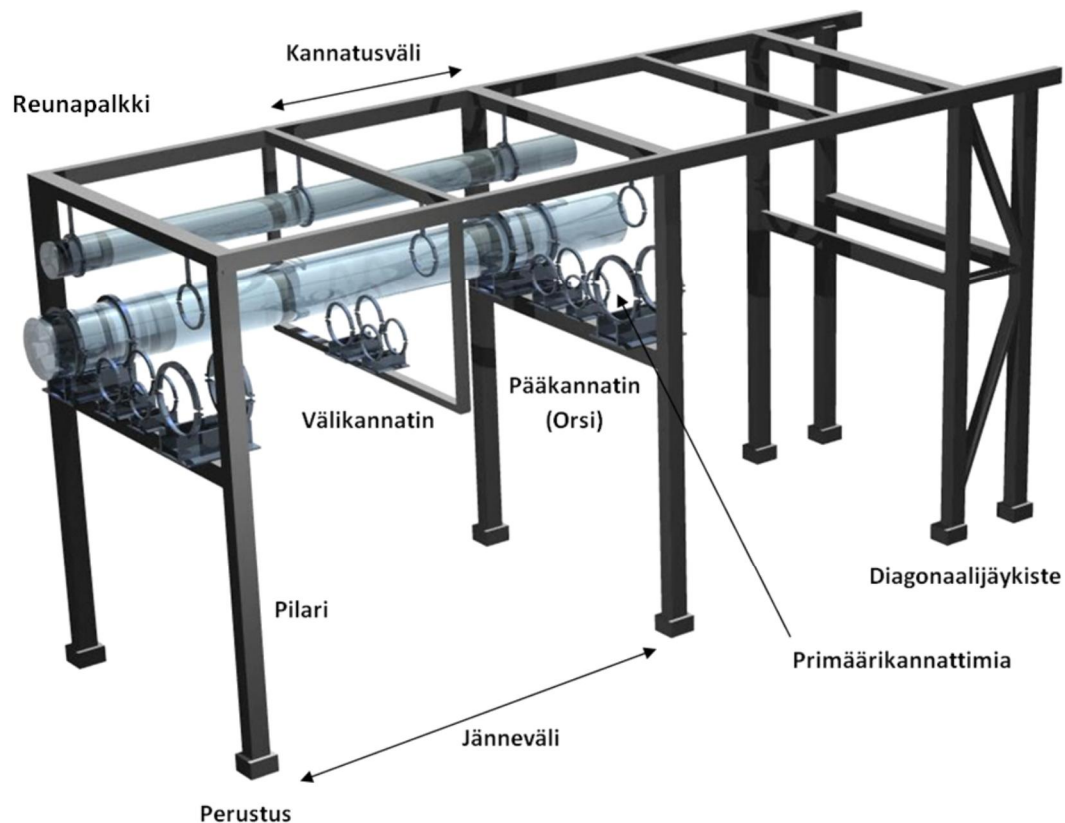
1.1 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena oli selvittää, miten onnistuu teräsrakenteiden siirtäminen PDMS -laitosmallinnusohjelman ja Finngen -lujuuslaskentaohjelman välillä. Tästä siirtämisestä tuli kirjoittaa selkeä ja yksinkertainen työkalu ja ohje, miten PDMS:ssä tehdystä teräsrakennemallista saadaan tehtyä SDNF-formaatin tiedosto, joka voidaan lukea Finngen:iin. Ohjeessa näytetään, miten Finngen:ssä voidaan rakenteelle asettaa kiinnityspisteet sekä asettaa rakenteelle halutunlainen kuormitus. Tämän jälkeen voidaan tarkastella rakenteeseen kohdistuvia jännityksiä sekä muodonmuutoksia ja näistä seuraten tehdä mahdolliset muutokset PDMS:n malliin. Muutosten jälkeen voidaan suorittaa uuden SDNF-tiedoston luominen ja tarkastella rakennetta uudelleen.

Työssä tarkastellaan myös putkisillan suunnitteluprosessia sekä suunnitteluun liittyviä eurokoodeja ja Suomen rakentamismääräyskokoelmia niiltä osin, jotka koskevat putkisiltojen suunnittelua.

1.2 Putkisilta

Putkisillat ovat teräsrakenteita, jotka ovat suunniteltu tukemaan useita, tehtaan prosesseille tärkeitä putkilinjoja rakennusten sekä laitteiden välillä. Putket kulkevat useassa tasossa, sekä yleensä sellaisella korkeudella, että putkisillan alitse on mahdollista kävellä tai kulkea työkoneilla. Putket sisältävät usein prosesseissa käytettäviä aineita tai valmiita tuotteita. Putkisillat yhdistävät usein tehdasalueen eri rakennukset ja täten joutuvat säästä johtuvien, vaihtuvien olosuhteiden sekä rasisusten alaiseiksi.



Kuva 1: Putkisilta [1]

1.3 Yritysesittely

Sweco on yksi Pohjoismaiden ja Euroopan johtavista rakentamisen asiantuntijayrityksistä. Sweco on alun perin ruotsalainen rakennetun ympäristön ja teollisuuden asiantuntijayritys, joka toimii kansainvälisesti 12 maassa. Swecon palveluksessa on insinöörejä, arkkitehtejä sekä ympäristöasiantuntijoita. Tämä tekee yrityksen toiminnasta laaja-alaisen ja mahdollistaa kaikkiin asiakkaiden vaatimiin toimeksiantoihin pätevän ja osaavan tiimin. Asiakkaille tarjotaan palveluita rakennetekniikan, talotekniikan, teollisuuden sekä ympäristö- ja yhdyskuntatekniikan aloilta. Myös projektinjohto- ja rakennuttamispalvelut sekä arkkitehtisuunnittelu ovat osa palveluita.

Sweco -konsernissa työskentelee 9000 työntekijää, johon kuuluu lähes 2000 Sweco Finland työntekijää ja asiantuntijaa 25 paikkakunnalla. Konserni toteuttaa vuosittain 80 maassa noin 37 000 projektia 15 000 asiakkaalle. Sweco Finlandin osuus tästä on noin 7500 toimeksiantoa vuosittain. Liikevaihto vuonna 2015 oli 178 milj. €

Uusimpia valmistuneita projekteja, joissa Sweco on ollut mukana, ovat esimerkiksi Helsingin Messukeskuksen laajennus, jossa Sweco toimi rakennesuunnittelussa. Myös

vuonna 2014 valmistuneen Tampereen Sokos Hotel Tornin rakennesuunnittelusta vastasi Sweco.

Tulevia suuria projekteja ovat esimerkiksi Espoon Keilaniemen neljä pyöreää asuintornitaloa, joka on edennyt hankesuunnitteluvaiheeseen, jossa Sweco vastaa asiantuntijana talotekniikan suunnittelusta. Metsä Fibre Oy:n Äänekosken tehdas – projekti, jossa Swecon vastuulla on viedä läpi tehtaan ympäristövaikutusten arviointiprosessi sekä vastata tehtaan esisuunnittelusta. Sweco on mukana myös mediassa paljon huomiota saaneen Helsinki-Tallinna tunneliyhteyden esiselvityksessä.

2. PUTKISILLAN SUUNNITTELUPROSESSI

Putkisillan suunnitteluprosessi voidaan jakaa kahteen osaan, joita ovat esisuunnittelu sekä yksityiskohtainen suunnittelu.

Tehtaan esisuunnittelu sisältää tehdasalueen ja ympäristön yleissuunnittelun. Esisuunnitelmassa määritetään ja suunnitellaan tehtaan eri osa-alueille tarkka kustannusarvio investointipäätöstä varten. Teknisten määrittelyjen sekä suunnitelmien lisäksi esisuunnittelussa laaditaan aikataulu, kannattavuuslaskelmat sekä määritetään projektin toteutustapa.

Putkisiltojen esisuunnittelu sisältää perustusten paikoittaminen, ja niille putkisillan jaloista johtuvat pysty- vaaka- sekä mahdollisten momenttikuormien määrittämisen. Suunnitelma sisältää myös siltalohkojen nostopainon, putkien sijainnin, mahdollisten lisätuntojen tarpeen sekä niiden paikoittamisen selvittämisen. Jotta putkisillalle voidaan toteuttaa esisuunnitelma, tarvitaan putkisillasta alustava ehdotus geometriaksi sekä materiaaleiksi. Geometrialle tulee näin tehdä alustavat, käsin tehdyt lujuuslaskelmat, jotka sisältävät putkisillan omapainosta, putkien massasta, lumikuormasta, tuulikuormasta sekä putkien lämpöliikkeistä johtuvat kuormitukset arvioiden perusteella. Putkisillan rakenteen jännityksille pidetään raja-arvona 100 MPa, jota eivät paarteiden keskellä esiintyvät jännitykset, pystypalkkien reunan puristusjännitys tai diagonaalien reunan vetojännitys ylittää.

Yksityiskohtainen suunnittelu tehdään, jotta putkisillasta saadaan toteutuskelpoinen suunnitelma. Suunnittelu sisältää standardien mukaiset lujuuslaskelmat sekä putkisillan osille tarkan osaluettelon määrittämisen. Suunnittelussa määritetään putkikannattimien paikoitus, sekä mahdollisten ylimääräisten kannatinhyllyjen suunnittelu. Yksityiskohtaisessa suunnittelussa tarkistetaan putkivetojen esteettömyys sekä mahdolliset paikalliset muutokset sillan rakenteessa. Tässä vaiheessa putkisillalle tehdään myös tarkat FEM-jännitys laskelmat sekä liitoslaskelmat.

Lujuuslaskenta-ohjelmia, kuten Finngen, käytetään molemmissa vaiheissa usein käsin tehtyjen laskujen tarkastamiseen. Näin eliminoidaan mahdolliset laskuvirheet.

Putkisillan esisuunnittelussa sekä yksityiskohtaisessa suunnittelussa tulee ottaa huomioon seuraavan laisia huomioita ja ohjeita.

Putkien massaa laskettaessa tulee ottaa huomioon putkessa liikkuvan materiaalin paino, sekä huomioitava mahdollinen lisäkapasiteetti. Putkien väliin tulee jättää 50 millimetrin väli, ottaen huomioi myös putken ympärillä olevan eristeen sekä eristeen suojan. Eri putkisiltojen hyllykorkeudet tulee mitoittaa samalle korkeudelle toistensa kanssa, jotta putkelle ei tule korkeusvaihtelua sen kulkiessa useammalla putkisillalla. Myös putkisillan

profiilien oma massa sekä lumesta ja jäädä johtuva lisämassa tulee ottaa huomioon lujuuslaskennassa.

Putkisillan profiilit ovat usein joko neliöprofiilia tai I-palkkeja. Neliöprofiilin etuja ovat hyvä lommahduksen sieto sekä valmiin rakenteen leveyden helppo laskeminen. I-profiilin etuna on kuljettamisen helppous pitkinäkin kappaleina, sekä rakenteen kasaamisen helppous kohdealueella, sillä I-profiililla voidaan liitokset tehdä pulttaamalla tai niitattavana.

Putkisillan suunnittelussa käytetään useita eri teorioita kestävyuden varmistamiseksi. Näitä teorioita ovat esimerkiksi seuraavat:

1. Vipuvoimilla lasketaan perustukselle riittävä massa, sekä tuenta, jolla estetään rakenteen kaatuminen. Kaatumista pyritään tarkastelemaan mahdollisimman yksinkertaisesti, tästä johtuen käytetään vipuvoimia hyväksikäyttäen.
2. Kehäperiaatteella lasketaan rakenteen profiileihin, etenkin diagonaaleihin, vaikuttavat voimat.
3. Energiaperiaatteella tarkastellaan liitoksia, sekä lasketaan nivelen plastisoitumiseen tarvittava voima sisäisen- ja ulkoisentyön periaatteella.
4. Flutter tarkastelulla huomioidaan liian ohkaisen rakenteen värähtelyn herääminen tuulella.

Monikerroksiset putkisillat voidaan suunnitella pidemmiksi, joka tulee huomioida putkisillan jalkojen paikoitusta suunniteltaessa. Rakennuskohteen nostokapasiteetti tulee kuitenkin huomioida, mikä rajoittaa putkisillan pituutta.

Pidempien putkisiltojen suunnittelussa on hyvä huomioida myös materiaalin lämpölaajeneminen sekä lämpösäteily eli konvektio. Lämpösäteilyllä tarkoitetaan putkisillan toisen puolen, usein yläpuolen, lämpenemistä auringonsäteilyn voimasta. Tämä jätetään kuitenkin usein huomioimatta, johtuen tuulesta, joka pienentää konvektiota. Voima, joka säteilystä syntyy, vaikuttaa myös putkisiltaan taivuttamalla tätä ylöspäin, joka voi johtaa siihen, että taivutusrajat tulevat vastaan. Auringon säteillä sivulta, vaikuttava konvektio jää huomattavasti pienemmäksi, koska sivuauringon säteily on huomattavasti heikompaa.

3. STANDARDIT SUUNNITTELUSSA

PUTKISILLAN

3.1 Suomessa käytettävät standardit

Suomessa rakenteiden suunnittelussa käytetään avuksi, eurokoodeiksi kutsuttuja, Euroopan yhteisiä standardeja, joiden rinnalle on liitetty kansalliset liitteet, jotka ottavat huomioon kansallisesti muuttuvat parametrit. Eurokoodien rinnalla käytetään avuksi Suomen rakentamismääräyskokoelmia. Tässä kappaleessa käydään läpi näiden standardien taustaa sekä putkisillan suunnittelussa käytettäviä standardeja.

3.1.1 Eurokoodiohjelma

Euroopan yhteisön komissio päätti vuonna 1975 rakennustekniikkaan liittyvästä toimenpideohjelmasta, jonka tavoitteena oli yhtenäistää eurooppalaiset suunnittelunormit. Tähän tarkoitukseen perustettiin jäsenvaltioiden edustajista koostuva komitea, jonka tehtävänä oli yhdistää Euroopan maiden rakennussuunnittelun suunnittelukäytännöt. Tähän kehitettäisiin yhdenmukaistetut tekniset säännöt, jotka kattaisivat rakennusten maa- ja vesirakennuskohteiden suunnittelun. Säättöjen rinnalle on luotu kansalliset liitteet, joissa otetaan huomioon kyseisessä maassa vaikuttavat mitoitusarvot, kuten lumi- sekä tuulikuormat. Uudet säännöt olisivat vaihtoehto voimassa oleville kansallisille säännöille ja tulevaisuudessa tulisivat korvaamaan ne. Täten syntyivät eurokoodit, jotka ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja. Ensimmäiset eurokoodit valmistuivat ja otettiin käyttöön vuonna 1980.

Eurokoodeissa esitetään rakenteiden ja rakenneosien suunnittelua varten rakennesuunnittelustandardit, joita vahvistetaan kansallisella standardilla ja liitteillä, jotka sisältävät tietoa kansallisista parametreista. Näitä parametreja ovat esimerkiksi arvot tai luokat ja maalle tunnusomaiset tiedot, kuten maantieteelliset ja ilmastoa koskeva parametrit. Suomen kansallinen osa on Suomen rakentamismääräyskokoelma.

Eurokoodit otettiin käyttöön Suomessa vuonna 2007 ja ne ovat vähitellen korvanneet Suomen rakentamismääräyskokoelman pääsuunnittelunormina. Vuodesta 2014 lähtien on suunnittelussa käytetty pääosin Eurokoodeja.

3.1.2 Suomen rakentamismääräyskokoelma

Maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellään yleiset rakentamista koskevat tekniset vaatimukset sekä rakentamiseen liittyvät lupamenettelyt ja viranomaisvalvonta. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa tarkennetaan maankäyttö- ja rakennuslaissa annettuja

rakentamista koskevia säännöksiä ja ohjeita. Uudisrakentamisessa rakentamismääräyskokoelman noudattaminen on sitovaa sekä korjausrakentamisessa määräykset katsotaan sitoviksi soveltuvin osin. Tapauskohtaisesti lopullisen päätöksen antaa rakennusvalvontaviranomainen.

Määräyskokoelmassa esitetyt rakentamista koskevat asetukset tulevat muuttumaan vuonna 2013 voimaan tulleen maankäyttö- ja rakennuslain muutosten mukaisiksi. Siirtymäaika tälle uudistamiselle on lain mukainen viisi vuotta, tämä tarkoittaa, että vuoteen 2018 mennessä uusi määräyskokoelma on käytössä maanlaajuisesti. Vanhoja määräyksiä voidaan soveltaa, kunnes uudet säännökset on annettu.

Rakennusmääräyskokoelma perustuu osittain kokonaisvarmuusmenetelmään, kun eurokoodin mukaiset standardit pohjautuvat tuloksia tarkentavaan osavarmuusmenetelmään.

3.2 Putkisillan suunnitteluun liittyvät standardit

Putkisillan suunnittelun avuksi löytyy eurokoodista viisi teräsrakenteisiin ja teräsrakentamiseen liittyvää standardia, joiden seuraamisesta on apua. Näitä standardeja ovat:

1. SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet
2. SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
3. SFS-EN 1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat
4. SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat
5. SFS-EN 1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu.

Eurokoodien lisäksi suunnittelussa voidaan käyttää avuksi Suomen rakentamismääräyskokoelmia. Määräyksistä putkisillan suunnitteluun voidaan soveltaa osioita:

1. B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräykset
2. B7: Teräsrakenteet, ohjeet

3.3 SFS-EN standardien käyttö putkisillan suunnittelussa

Tämän otsikon alla käydään läpi edellä mainittuja SFS-EN standardeja ja niiden sisältöä. Tarkastelussa rajataan standardien sisällöstä pääkohdat sekä ne osat, jotka voidaan olettaa liittyvän putkisillan suunnitteluprosessiin.

3.3.1 SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet

Standardissa EN 1990 käsitellään suunnitteluperusteita sekä käsittelee rakenteeseen kohdistuvia rasituksia. Rasitus voi johtua rakenteelle asetetuista kuormista tai ulkoisista tekijöistä. Rakenteelle tulee suorittaa tarkastelu erikseen sekä murtorajatilassa ja käyttörajatilassa. Jos voidaan todeta, että toisen rajatilan vaatimukset täyttyessään täyttävät myös toisen vaatimustason, riittää tällöin vain toisen rajatilan mukainen tarkastelu. Rajatiloihin liittyy myös mitoitusilanteet, jotka ottavat huomioon olosuhteet, jossa rakenteen oletetaan olevan. Mitoitusilanteita ovat normaali-, tilapäinen- sekä onnettomuustilanne. Rajatiloista kerrotaan tarkemmin standardissa EN 1993-1-1. Nämä ovat perusvaatimuksia, jotka rakenteen tulee kestää suunnitellun käyttöikänsä ajan. Standardi EN 1990 on tarkoitettu käytettäväksi standardien EN 1991-1999 rinnalla. Sitä voidaan käyttää ohjeellisena sellaisten rakenteiden suunnittelussa, jotka sisältävät materiaaleja tai kuormia, mitkä eivät sisälly standardeihin 1991-1999.

Standardissa esitetään vaihtoehtoisia menettelytapoja, arvoja ja luokitus suosituksia, joita tehtäessä voidaan tehdä kansallisia valintoja. Tästä johtuen standardi sisältää kansallisen liitteen, joka sisältää kaikki kansalliset parametrit, joita kyseisessä maassa tulee ottaa huomioon.

Kuormat jaotellaan rakenteille kolmeen ryhmään: pysyvät kuormat, muuttuvat kuormat ja onnettomuuskuormat. Pysyviä kuormia ovat esimerkiksi rakenteiden tai kiinteiden laitteiden oma paino. Muuttuvia kuormia ovat esimerkiksi tuuli- sekä lumikuormat. Onnettomuuskuormiksi luetaan räjähdykset tai ajoneuvojen törmäykset. Kuormat luokitellaan myös alkuperän perusteella välittömiksi tai välillisiksi, vaikutuskohdan vaihtelun mukaan joko kiinteiksi tai liikkuviksi sekä kuormituksen luonteen mukaan staattisiksi tai dynaamisiksi.

Eurokoodissa käytettävässä osavarmuuslukumenetelmässä tulee voida osoittaa, että rajatiloista yksikään ei ylitä tarkasteltavissa mitoitusilanteissa. Osavarmuuslukumenetelmällä pyritään tutkimaan rakenteelle suurimmat rasitukset ja epäedulliset olosuhteet.

Murtorajatilalla tarkoitetaan tilaa, jolloin rakenne vaurioituu tai sortuu. Yleensä tämä tarkoittaa rakenteen murtumista ja tasapainon menettämistä. Rajatilat, jotka voidaan olettaa liittyvän ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen, luokitellaan murtorajatiloiksi. Laskennassa rakenteelle etsitään vaarallisimpia kuormitusyhdistelmiä, joissa vaikuttavien kuormien arvoa on osavarmuuslukuilla kertomalla suurennettu tai pienennetty. Jos jokin seuraavista murtorajatiloista tulee rakenteelle kyseeseen, tulee ne tarkistaa:

1. EQU (equilibrium) rakenteen tai sen osan staattisen tasapainon menetys
2. STR (strength) rakenteen tai sen osan murtuminen tai liian suuri siirtymätila

3. GEO (geotechnical) maan pettäminen tai liian suuri siirtymätila
4. FAT (fatigue) rakenteen tai sen osan väsymismurtuminen

Staattisen tasapainon rajatilaa tarkasteltaessa on tärkeää, että rakenteen tasapainoa haittaavat kuorman arvot ovat pienempiä, kuin tasapainolle edulliset arvot. Poikkileikkauksen tai liitoksen murtumisen tai liian suuren siirtymisen rajatilan tarkastelussa tulee varmistaa, että kuormien vaikutukset (sisäinen voima, momentti tai voimien yhdistetty voima- tai momenttikuormitus) on pienempi kuin vastaava rakenteen kestävyysarvo. Standardin liitteissä on rajatiloille annettu taulukot, joista saadaan kuormille mitoitusarvot.

Taulukko 1: Kuormien mitoitusarvot EQU rajatilassa (SFS EN-1990 s.88)

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitusolot	Pysyvät kuormat		Määrittävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat	
	Epäedulliset	Edulliset		Pääasiallinen (jos on)	Muut
(Yht. 6.10)	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(*) Muuttuvia kuormia ovat taulukossa A1.1 mainitut kuormat.					
<p>HUOM. 1 Osavarmuuslukujen γ arvot voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Osavarmuusluvun γ suositeltavat arvot ovat:</p> <p>$\gamma_{G,j,sup} = 1,10$ $\gamma_{G,j,inf} = 0,90$ $\gamma_{Q,1} = 1,50$ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa) $\gamma_{Q,i} = 1,50$ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa)</p> <p>HUOM. 2 Tapauksissa, joissa staattisen tasapainon tarkastelu sisältää myös rakenneosien kestävyys, voidaan vaihtoehtona kahdelle erilliselle, taulukoihin A1.2(A) ja A1.2(B) perustuvalle tarkastelulle käyttää kansallisen liitteen niin salliessa yhdistettyä tarkastelua, joka perustuu taulukkoon A1.2(A), jolloin käytetään seuraavia suositeltavia arvoja. Kansallisessa liitteessä näistä suositeltavista arvoista voidaan poiketa.</p> <p>$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$ $\gamma_{G,j,inf} = 1,15$ $\gamma_{Q,1} = 1,50$ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa) $\gamma_{Q,i} = 1,50$ epäedullisessa tapauksessa (0 edullisessa tapauksessa).</p> <p>Tämä edellyttää, että jos osavarmuusluvun arvoa $\gamma_{G,j,inf} = 1,00$ käytetään sekä pysyvien kuormien edulliselle osuudelle että epäedulliselle osuudelle, niin ei saada epäedullisempaa vaikutusta.</p>					
<ACI					

Käyttörajatila tarkoitetaan tilaa, jonka ylittyminen tarkoittaa, että rakenteen käyttökelpoisuusvaatimukset eivät enää täyty. Tämä tarkoittaa rajatilojen tarkastelua, jotka vaikuttavat rakenteen toimintaan normaalikäytössä ja aiheuttavat muodonmuutoksia. Murtorajatilasta ja käyttörajatilasta kerrotaan tarkemmin standardissa ES 1993-1-1. Käyttörajatilatarkastelussa tulee osoittaa, että rakenteen rajoittavien mitoitusarvojen käyttökelpoisuuskriteerit, jotka on määriteltä kyseiselle rakenteelle/hankkeelle, ylittävät käyttökelpoisuuskriteerissä määriteltujen kuormien mitoitusarvot. Putkisillalle usein riittää STR mukainen murtorajatilatarkastelu. EQU:n mukaiset kuormitusyhdistelyt ovat usein hieman pienemmät, jolloin STR mukainen tarkastelu antaa rakenteelle lisää varmuutta. Tämä tulee kuitenkin varmistaa aina tapauskohtaisesti.

Kun aloitetaan murtorajatilamitoitusta, rakenteelle annetaan ensin luotettavuusluokka ja kuormakerroin rakenteen seuraamusluokan mukaan. Seuraamusluokka valitaan rakenteen mahdollisesta vaurioitumisesta aiheutuvan onnettomuuden laajuuden mukaan. Tähän vaikuttavat henkilövahinkojen suuruus, ympäristölle aiheutuvat tai taloudelliset

vahingot. Seuraamusluokka voidaan valita EN 1990 standardissa olevan taulukon (taulukko 2) mukaan.

Taulukko 2: Rakenteen seuraamusluokan määrittäminen (SFS EN-1990 s.136)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret (esim. konserttitalo)
CC2	Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret (esim. toimistorakennus)
CC1	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varastorakennukset), kasvihuoneet

Seuraamusluokat CC1, CC2 ja CC3 liitetään yleensä kolmeen luotettavuusluokkaan RC1, RC2 ja RC3. Täten voidaan valita rakenteelle kuormakerroin taulukosta 3.

Taulukko 3: Rakenteen kuormakerroin (SFS EN-1990 s.138)

Kuormakerroin K_{FI}	Luotettavuusluokka		
	RC1	RC2	RC3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

Taulukoiden perusteella putkisillalle käytetään usein seuraamusluokkaa CC2, niillä perustein, että rakenne ei kannaa ihmisiä, kuten CC3 luokan rakenteet, mutta putkisillan putket sisältävät usein hyvin haitallisia aineita, jotka aiheuttavat suuren vaaran ja uhan ihmishenkien menetykselle. Näin saadaan putkisillalle kuormituskerroin $K_{FI} = 1.0$.

Murtorajatilatarkastelussa tulee kuormille tehdä kuormayhdistely. Tällä tarkoitetaan kuormista johtuvien erilaisten yhdistelmien tarkastelua, joista muodostuu putkisillalle seuraavat ääriparit: pystykuorman minimi ja maksimi, lämpökuorman minimi ja maksimi, tuulikuormat kahdeksasta suunnasta. Kuormitusyhdistelmistä tulee määrittää se, joka on kyseisessä tapauksessa määräävä. Määräväälle yhdistelmälle annetaan suurempi kerroin kuin muille kuormille. Kuormayhdistelmille määritetään myös kertoimet, jotka voidaan STR murtoraja tilanteessa laskea standardin SFS EN-1990 taulukko A1.2(B) s.90 mukaan. Näin saadaan seuraavan taulukon mukaiset arvot kuormayhdistelmien kertoimille.

Taulukko 4: Kuormayhdistelmien kertoimet

	Pysyvä epäedullinen kuorma	Pysyvä edullinen kuorma	Määräävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat
Pysyvät pystykuormat	1,35	1,0		

Kaikki kuormat	1,15		1,5	$1,5 \cdot \psi_0$
----------------	------	--	-----	--------------------

Standardin taulukosta A1.1 (s.86) saadaan muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_0 . Taulukosta on poimittu tarvittavat kertoimet putkisiltasuunnittelussa.

Taulukko 5: Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_0

-kuorma	ψ_0
lumi	0,7
tuuli	0,6
lämpö	0,6

3.3.2 SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

Standardi EN 1993-1 on yksi kuudesta rakenteita koskevasta standardista, jotka sisältävät yleisiä suunnittelusääntöjä sekä rakennuksia koskevia lisäsääntöjä. EN 1993-1 sisältää myös kaksitoista osaa, joista jokainen koskee erityisiä teräsrakenneosia, rajatiloja tai materiaaleja. Suunnittelussa saavutetaan hyväksyttävä luotettavuustaso standardissa esitettävillä osavarmuusluvulla sekä suositetuilla perusarvoilla. Standardi sisältää myös kansallisen liitteen, joka sisältää kaikki tarvittavat kansalliset parametrit.

Teräsrakenteita suunniteltaessa käytetään EN 1990 mukaisia yleisiä sääntöjä. Näiden lisäksi noudatetaan myös EN 1993 standardissa esitettyjä teräsrakenteiden lisäsääntöjä. EN 1993 sisältää vain teräsrakenteille asetettuja vaatimuksia sekä reunaehtoja kestävyys, käytettävyyden, säilyvyyden ja palonkestävyyden osalta. Osassa 1-1 esitetään suunnittelussa käytettäviä perussääntöjä sekä annetaan lisäsääntöjä teräksestä tehdyille rakennuksille. EN 1990 perusvaatimukset voidaan todeta täytetyiksi, kun murtorajatilamitoitus noudattaa EN 1990 mukaista osavarmuuslukumenetelmää ja kuormitusyhdistelmät noudattavat EN 1991 mukaisia kuormia. Standardissa eri teräslaaduille annetaan normit ja vaatimukset sitkeydelle murtumissitkeydelle, paksuussuuntaisille ominaisuuksille ja toleransseille.

Standardissa käydään läpi rakenteelle analyysimenetelmät, jotka ottavat huomioon materiaalin epälineaarisuuden. Rakenteeseen vaikuttavat sisäiset voimat ja momentit voidaan laskea joko kimmoteorian tai plastisuusteorian mukaisen kokonaistarkastelun mukaan. Näistä kimmoteoria kattaa kaikki tapaukset, mutta plastisuusteorian mukainen kokonaisanalyysi voidaan toteuttaa vain rakenteelle, jossa sauvoilla ja liitoksilla on riittävä kiertymiskyky plastisten nivelten kohdalla. Tämä edellyttää, että plastisen nivelen kohdalta sauva kuuluu poikkileikkausluokkaan 1. Sauvan tulee myös olla stabiili plastisessa nivelessä.

Kimmoteorian mukainen kokonaistarkastelu perustuu sille, että käytettävä materiaali käyttäytyy lineaarisesti jännitys-venymä kuvaajan mukaan, jännitystasosta riippumatta. Vaikka poikkileikkauksen kestävyys lasketaan plastisuusteorian mukaan, sisäiset voimat ja momentit voidaan laskea kimmoteorian kokonaistarkastelun mukaisesti. Rakenteelle voidaan suorittaa kimmoteorian mukainen kokonaistarkastelu myös tilanteessa, jossa paikallisen lommahtamisen katsotaan rajoittavan poikkileikkauksen kestävyyttä.

Kun rakennejärjestelmään vaikuttavia voimasuureita lasketaan, tulee plastisuusteorian mukaisessa kokonaistarkastelussa ottaa huomioon materiaalin epälineaarisuuden vaikutus. Rakenteen liitosten toiminta mallinnetaan yhdellä seuraavasta kolmesta menetelmästä

1. kimmo-plastinen analyysi, jossa rakenteen liitoksiin muodostuu plastisia niveliä
2. epälineaarinen plastisuusteoria mukainen analyysi, joka huomioi plastisen alueen muutokset sauvan osittaisessa plastisoitumisessa
3. jäykkä-plastinen analyysi, jossa nivelten välissä, mahdollisesti esiintyvää, kimmoista käyttäytyminen voidaan jättää huomiotta. (SFS-EN 1993-1-1, s. 41)

Jotta voidaan käyttää plastisuusteorian mukaista kokonaistarkastelua, tulee liitoksilla vaadittavaa taivutusmomentin uudelleenjakautumista varten olla riittävä kiertymiskyky.

Standardissa esitetään myös poikkileikkausluokitus, jonka tarkoituksena on tunnistaa, miten paljon poikkileikkauksen kestävyyttä ja kiertymiskykyä paikallinen lommahtaminen rajoittaa. Poikkileikkausluokat on jaettu neljään osaan.

1. Poikkileikkausluokka: ”plastisuusteorian vaatima, riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel voi syntyä ilman, että poikkileikkauksen kestävyyttä tarvitsee pienentää” (SFS-EN 1993-1-1, s. 42)
2. Poikkileikkausluokka: ”ovat niitä joissa voi kehittyä plastisuusteorian mukainen sauvan taivutuskestävyys, mutta joilla paikallinen lommahdus rajoittaa kiertymiskykyä” (SFS-EN 1993-1-1, s. 42)
3. Poikkileikkausluokka: ”ovat niitä, joissa sauvan äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen” (SFS-EN 1993-1-1, s. 42)
4. Poikkileikkausluokka: ”ovat niitä, joissa paikallinen lommahdus esiintyy ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossakin pisteessä” (SFS-EN 1993-1-1, s. 42)

Poikkileikkausluokka määräytyy puristettavien levyjen leveys-paksuussuhteista. Tarkasteltavana olevan rakenteen kaikki ne osat, joihin syntyy osittainen tai täysi puristus kuormitusyhdistelmän vaikutuksesta, kuuluu poikkileikkauksen puristettuun osaan. Poikkileikkausluokka määritetään laipalle sekä uumalle erikseen, sillä joissain tapauksissa luokka voi näillä olla eri. Poikkileikkausluokaksi koko profiilille valitaan se

luokka, kumpi on suurempi (uuma vai laippa). Poikkileikkausluokan valintaan voidaan käyttää apuna taulukoita 6 ja 7.

Taulukko 6: Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS EN-1993-1-1 s.45)

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat							
				Taivutus ko. akselin suhteen			
				Taivutus ko. akselin suhteen			
Poikkileik- kauluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat				
Taso-osan jännitysja- kautuma (puristus positiivinen)							
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$				
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$				
Taso-osan jännitys- jakautuma (puristus positiivinen)							
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$\text{kun } \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $\text{kun } \psi \leq -1^{\text{a)}}: c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

Taulukko 7: Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS EN-1993-1-1 s.46)

Ulokkeelliset laipat

Valssatut profiilit

Hitsatut profiilit

Poikkileikkauksluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu	Vapaa reuna on vedetty			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ ⁵⁾ k_σ ks. EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Murtorajatilataarkastelussa missään poikkileikkauksessa voimasuureen mitoitusarvo ei saa ylittää kyseisen poikkileikkauksen kestävyysmitoitussarvoa, tämä tarkoittaa myös yhdistettyjen voimien vaikutusta. Kestävyyden mitoitusarvo on riippuvainen edellä mainituista poikkileikkauksluokista. Jos poikkileikkauksen tehollisia ominaisuuksia käytetään poikkileikkauksluokassa 4, voidaan todeta, että kimmoteorian mukainen kestävyys on mahdollista todentaa kaikissa poikkileikkauksluokissa. Plastisuusteorian mukainen kestävyys todennetaan etsimällä sisäisten voimien ja momenttien kanssa tasapainoinen jännitysjaakauma, joka ei ylitä myötärajaa. Tämä edellyttää, että jännitysjaakauma ottaa huomioon mahdolliset plastiset muodonmuutokset. Jos poikkileikkauksen kaikki osat ovat vähintään poikkileikkauksluokkaa 2, voidaan poikkileikkauksen taivutusjäykkyys laskea täysin plastisoituneen tilanteen mukaan. Kun osat ovat vähintään poikkileikkauksluokkaa 3, taivutuskestävyys lasketaan koko poikkileikkauksen yli lineaarisen kimmoteorian mukaan jakaantuneiden venymien perusteella edellyttäen, että puristusjännitykset eivät ylitä myötärajaa.

Puristetun sauvan nurjahduskestävyys tarkastelussa tulee varmistaa, että puristava voima on pienempi kuin sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo. Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{poikkileikkauksluokille 1, 2 ja 3}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{poikkileikkausluokalle 4}$$

missä:

χ on nurjahduskestävyyden pienennystekijä

A / A_{eff} on poikkileikkauksen pinta-ala / poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

f_y on myötöraja (yksikkö N/mm²)

γ_{M1} on sauvan kestävyysosavarmuusluku.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \chi \text{ tullee olla } \leq 1,0$$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$$

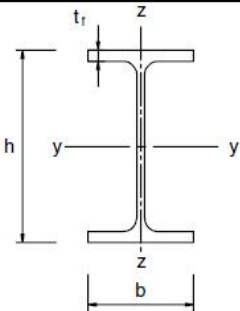
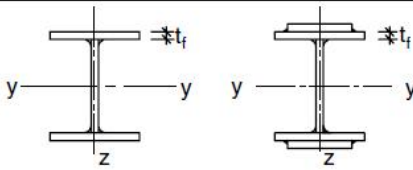

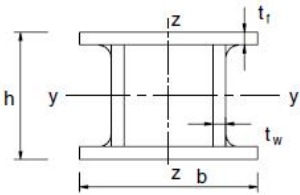
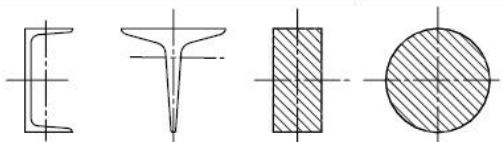
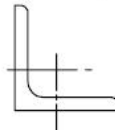
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$$

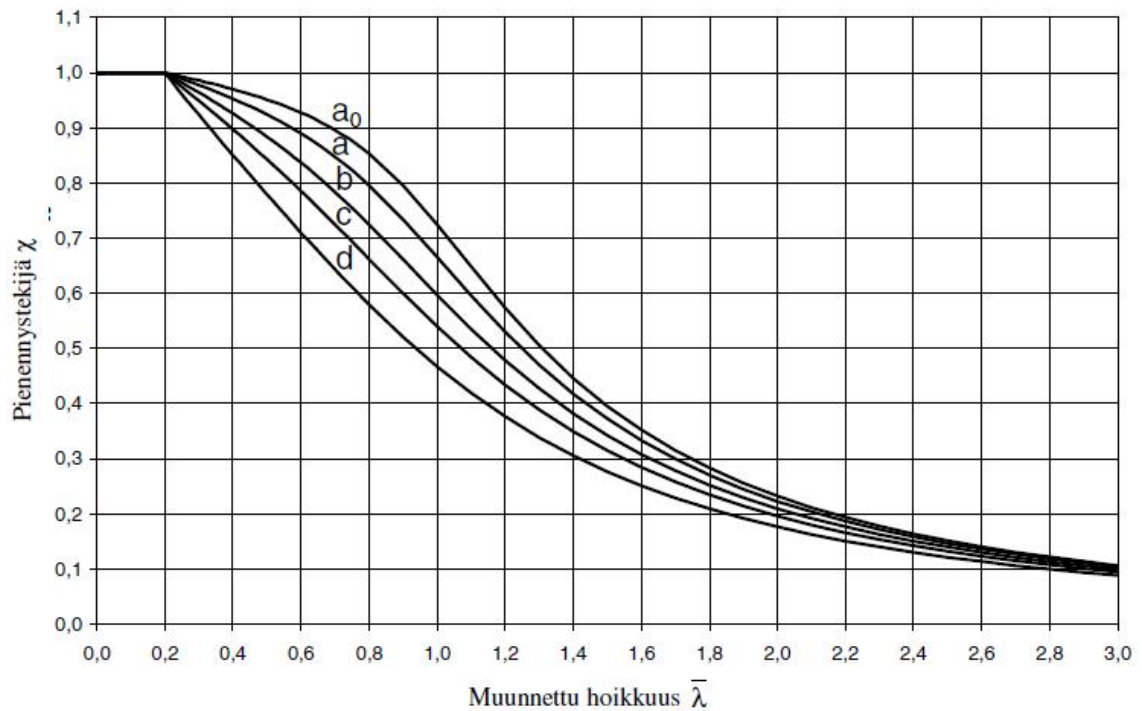
Kaavoissa esiintyvä α on epätarkkuustekijä, joka saadaan katsomalla seuraavaa taulukkoa ja kuvia. Symboli $\bar{\lambda}$ tarkoittaa muunnettua hoikkuutta. Kun $\bar{\lambda} \leq 0,2$ tai $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$ nurjahdusta sauvalla ei tarvitse tarkistaa, vaan poikkileikkauksen tarkistus riittää.

Taulukko 8: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät

Nurjahduskäyrä	a ₀	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 9: Nurjahduskäyrän valinta poikkileikkauksesta riippuen (SFS-EN 1993-1-1 s. 64)

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Valssatut profiilit		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y – y z – z	a a ₀	
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y – y z – z	b a	
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y – y z – z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y – y z – z	d d	c c
Hitsaut I-profiilit		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y – y z – z	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		y – y z – z	c d	c d
Rakenneputket		Kuumamuovattu		Kaikki	a	a ₀
		Kylmämuovattu		Kaikki	c	c
Hitsaut koteloprofiilit		Yleensä (poikkeus, ks. alla)		Kaikki	b	b
		Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Kaikki	c	c
U-, T- ja umpiprofiilit				Kaikki	c	c
L-teräkset				Kaikki	b	b



Kuva 2: Nurjahduskäyrät (SFS-EN 1993-1-1 s. 64))

Taivutusnurjahdustapauksessa muunnettu hoikkuus lasketaan kaavoista:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{poikkileikkausluokalle 4}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

missä L_{cr} on sauvan nurjahduspituus, sekä i on kyseisen akselin suhteen laskettu hitaussäde.

Vääntö- ja taivutusvääntönurjahdustilanteen muunnettuhoikkuus $\bar{\lambda}_T$ lasketaan samoilla kaavoilla kuin puristetun sauvan nurjahduskestävyyden tarkastelussa. Kaavoissa tulee huomioida, että $N_{cr} = N_{cr,TF}$ mutta $N_{cr} < N_{cr,T}$, jossa $N_{cr,TF}$ on kimmoteorian mukainen taivutusnurjahduskuorma ja $N_{cr,T}$ on kimmoteorian mukainen vääntönurjahduskuorma. Jos sauvan poikkileikkaus on avoin, tulee huomioida, että sauvan puristuskestävyys vääntö- ja taivutusvääntönurjahdustapauksessa voi olla pienempi kuin taivutusnurjahdustapauksessa.

Koska putkisilloissa käytetään usein profiililtaan neliön tai suorakaiteen muotoista rakenneputkea ei kiepahdusta tarvitse tarkastella, sillä standardin mukaan nämä profiilit eivät ole alttiita kiepahdukselle.

3.3.3 SFS-EN 1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuorma

Standardissa EN 1991-1-3 käsitellään suunnitteluohjeita maa- ja vesirakennuskohteille ottaen huomioon lumikuormat. Standardin kansallinen liite sisältää kaikki tarvittavat parametrit, joita käytetään kyseisessä maassa. Standardissa otetaan huomioon myös poikkeukselliset lumisateet sekä lumen kinostuminen. Lumikuormat luokitellaan muuttuviksi, kiinteiksi kuormiksi.

Lumen kinostuminen voi olla hyvinkin monimuotoista riippuen pinnasta ja sen ominaisuuksista. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa rakenteen / katon muoto, sen lämpöominaisuudet, pinnan karheus, muiden rakennusten etäisyys, ympäröivä maasto, paikallinen ilmasto, erityisesti tuulisuus, lämpötilan vaihtelu ja sademäärä. Lumikuormat s [kN/mm^2] määritetään normaalisti vallitsevissa / tilapäisissä mitoitusolosuhteissa seuraavalla kaavalla:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k$$

missä μ_i on lumikuorman muotokerroin, s_k on ominaisarvo maanpinnan lumikuormalle, C_e on tuulensuojaisuuskerroin sekä C_t on lämpökerroin.

Tuulensuojaisuuskerroin C_e arvoa tarkasteltaessa tulee huomioda myös rakenteen ympärillä tapahtuvat muutokset, kuten uudet rakennuskohteet tai metsän kaataminen. Kertoimelle käytetään arvoa 1,0, ellei muita arvoja määritellä käytettäväksi eri maastotyyppien kanssa. Seuraavassa taulukossa annetaan maastotyyppien tuulensuojaisuuksikertoimien arvot.

Taulukko 10: Eri maastotyyppien yhteydessä käytettävät tuulensuojaisuuksikertoimelle suositeltavat arvot (SFS-EN 1991-1-3 s. 28)

Maastotyyppi	C_e
Tuulinen ^a	0,8
Normaali ^b	1,0
Suojainen ^c	1,2

^a Tuulinen maasto: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän.
^b Normaali maasto: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta.
^c Suojainen maasto: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.

Lämpötilakerroin C_t huomioi lämpöhäviöstä aiheutuvan sulamisen, kun lämmönläpäisevyys on suuri. Tämä otetaan huomioon etenkin lasikatteisilla katoilla. Teräsrakenteille sekä muille tapauksille kertoimena pidetään arvoa 1,0.

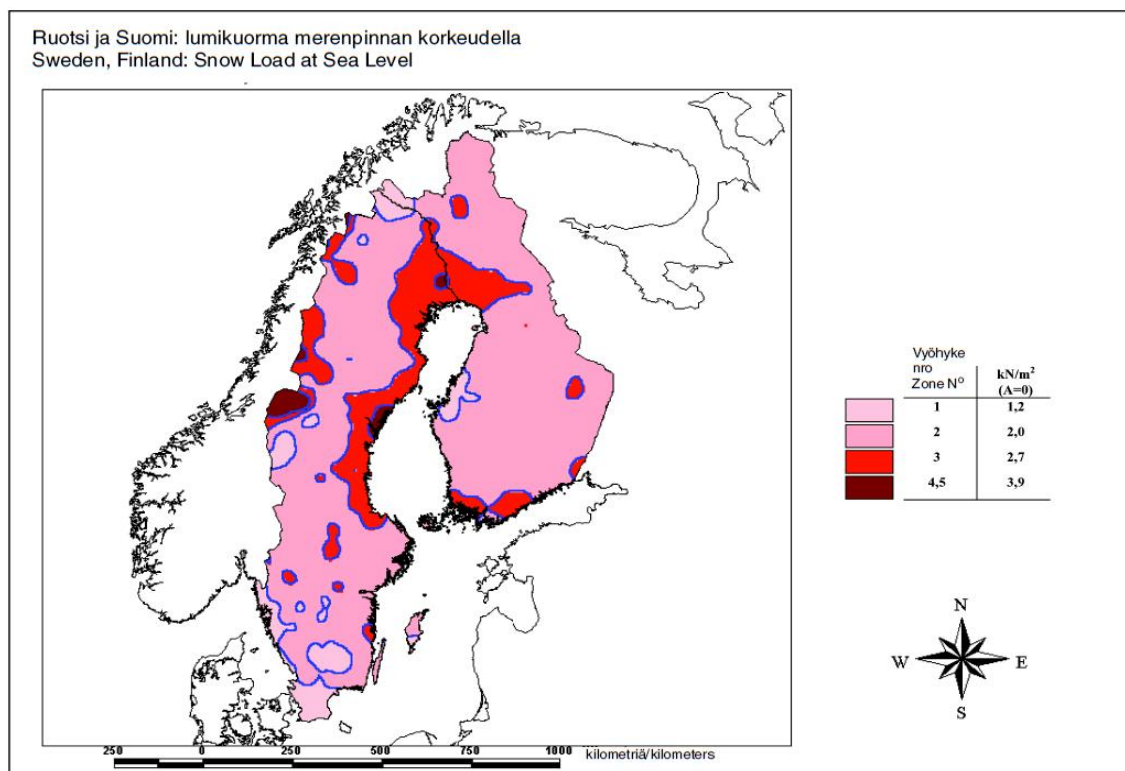
Standardissa käydään läpi myös erilaisten kattojen lumikuorman muotokertoimet ja kuormituskaaviot. Standardissa esitetyt katot ovat pulpetti-, harja-, saha- sekä kaarikatot. Myös lumen kinostuminen erilaisiin ulkonemiin ja esteisiin on käsitelty standardissa. Näitä ovat esimerkiksi lumiasteet tai räystäät. Liitteissä käsitellään myös poikkeuksellista kinostumista ja sen yhteydessä käytettäviä muotokertoimia.

Standardin liitteissä olevassa taulukossa esitetään neljä erilaista tapausta, joista saadaan kyseisessä tapauksessa käytettävä mitoitus tilanne ja kuormituskaavio.

Taulukko 11: Esimerkkitapaukset luomikuorman mitoitus tilanteille sekä näiden kuormituskaaviot (SFS-EN 1991-1-3 s. 48)

Normaali	Poikkeukselliset olosuhteet		
Tapaus A	Tapaus B1	Tapaus B2	Tapaus B3
Ei poikkeuksellisia sateita Ei poikkeuksellista kinostumista	Poikkeuksellisia sateita Ei poikkeuksellista kinostumista	Ei poikkeuksellisia sateita Poikkeuksellista kinostumista	Poikkeuksellisia sateita Poikkeuksellista kinostumista
3.2(1)	3.3(1)	3.3(2)	3.3(3)
Normaalisti vallitseva / tilapäinen mitoitus tilanne [1] kinostumaton $\mu_i C_e C_t s_k$ [2] kinostunut $\mu_i C_e C_t s_k$	Normaalisti vallitseva / tilapäinen mitoitus tilanne [1] kinostumaton $\mu_i C_e C_t s_k$ [2] kinostunut $\mu_i C_e C_t s_k$ Onnettomuusmitoitus tilanne (jolloin lumi on onnettomuuskuorma) [3] kinostumaton $\mu_i C_e C_t C_{esi} s_k$ [4] kinostunut $\mu_i C_e C_t C_{esi} s_k$	Normaalisti vallitseva / tilapäinen mitoitus tilanne [1] kinostumaton $\mu_i C_e C_t s_k$ [2] kinostunut $\mu_i C_e C_t s_k$ (paitsi liitteen B mukaisille kattomuodoille) Onnettomuusmitoitus tilanne (jolloin lumi on onnettomuuskuorma) [3] kinostunut $\mu_i s_k$ (liitteen B mukaisille kattomuodoille)	Normaalisti vallitseva / tilapäinen mitoitus tilanne [1] kinostumaton $\mu_i C_e C_t s_k$ [2] kinostunut $\mu_i C_e C_t s_k$ (paitsi liitteen B mukaisille kattomuodoille) Onnettomuusmitoitus tilanne (jolloin lumi on onnettomuuskuorma) [3] kinostumaton $\mu_i C_e C_t C_{esi} s_k$ [4] kinostunut $\mu_i s_k$ (liitteen B mukaisille kattomuodoille)
HUOM. 1 Poikkeukselliset olosuhteet määritellään kansallisen liitteen mukaisesti.			
HUOM. 2 Tapauksen B1 ja B3 yhteydessä kansallisessa liitteessä voidaan määrittellä luvussa 6 käsiteltyjen paikallisten vaikutusten yhteydessä käytettävät mitoitus tilanteet			

Liitteissä esitetään myös Euroopan maiden lumikarttoja, joissa esitetään lumikuormien 50 vuoden keskimääräinen toistumisväli. Lumikarttoja käytetään yhdessä annetun sijaintikorkeuden ja lumikuorman välisen yhteyden lausekkeita lumikuorman laskemiseen.



Kuva 3 : Ruotsin ja Suomen lumikuorma merenpinnan korkeudella (SFS-EN 1993-1-1 s. 64)

Lumikuormasta aiheutuvien kattokuormien soveltaminen teräsrakenteille, kuten putkisillalle, on hyvin hankalaa. Usein päädytäänkin arvioimaan maksimilumikuorman suuruutta vanhoihin vastaavien rakenteiden lujuuslaskentaraportteihin. Yrityksen vanhoissa töissä lumikuormalle on käytetty arvoa 1000 N/m^2 . Kuten voidaan todeta kuvasta 2, kattokuormille lumikuorman maksimi Porin korkeudella on 2000 N/m^2 . Koska voidaan olettaa, että putkisilta on säälle alttiina, etenkin tuulelle, sisältää 1000 N/m^2 lumikuorma ylimääräistä varmuutta.

3.3.4 SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat

Standardissa esitetään maa- ja vesirakennuskohteisiin vaikuttavien tuulikuormien määrittämiseen ohjeita. Kansallisessa liitteessä käydään läpi muun muassa sijainnista ja maaston tyypistä johtuvat vaihtelut tuulikuormalle. Tuulesta johtuvasta paineesta aiheutuu rakenteen pintaa vastaan kohtisuoria voimia. Tulee ottaa huomioon, että putkisillan avoimesta rakenteesta johtuen painetta muodostuu ulkopinnan lisäksi myös sisäpintoihin. Tuulikuormasta johtuvat paineet tai voimat esitetään yksinkertaistettuna joukkona, joiden vaikutukset rakenteelle ovat samat, kuin tuulenpuuskista aiheutuvat suurimmat vaikutukset. Tuulikuorman suuruuteen vaikuttavat rakenteen läheinen maasto sekä muut läheiset rakenteet. Maaston vaikutus tuulikuormaan voidaan luokitella viiteen

eri maastoluokkaan, jotka on esitetty taulukossa 13. Tuulikuorman määrittämisessä edetään seuraavassa järjestyksessä:

1. Maastoluokan valitseminen
2. Maanpinnanmuotojen vaikutuksen arvioiminen
3. Puuskanopeuspaineen määrittäminen
4. Kokonaistuulivoiman tai tuulipaineen laskenta

Standardissa lasketut tuulikuormat ovat ominaisarvoja. tuulennopeudelle sekä nopeuspaineelle on määritetty perusarvot. Arvoille on määritetty ominaisarvo, joka on mitattu 50 vuoden toistumisjaksolla. Tuulennopeudelle on asetettu ominaisarvo $v_{b,0}$, joka määrittää modifioimattoman perusarvon. Tämä arvo on määritelty arvoksi, joka on tuulennopeuden suunnasta sekä vuodenajasta riippumaton 10 minuutin keskiarvo, 10 m korkeudella maanpinnasta avoimessa maastossa jossa ei ole puustoa tai muita erillisiä tuulenesteitä. Tuulennopeuden perusarvo voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

missä:

v_b	on tuulennopeuden perusarvo. Perusarvo on määritelty seuraavasti: tuulen suunnan ja vuodenajan funktiona, 10 m korkeudella maanpinnasta maastoluokkaan 2 (taulukko 12) kuuluva arvo
c_{dir}	on tuulen suuntakerroin, joka voidaan esittää standardin kansallisessa liitteessä. Suositus arvo on 1,0
c_{season}	on vuodenaikakerroin, joka voidaan esittää standardin kansallisessa liitteessä. Suositus arvo on 1,0
$v_{b,0}$	on tuulennopeuden modifioimaton perusarvo.

Modifioitu tuulennopeuden perusarvo ottaa huomioon maaston rosoisuuskertoimen sekä pinnanmuotokerroimen. Modifioitu perusarvo korkeudella z maanpinnan yläpuolella voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b$$

missä:

$c_r(z)$	on rosoisuuskierroin
$c_0(z)$	on pinnanmuotokerroin, jonka arvo on 1,0, ellei rakenteen läheisyydessä ole esimerkiksi mäki tai jyrkänne, jolloin tulee kerrointa muuttaa kansallisen liitteen ohjeiden mukaan.

Rosoisuuskertoimen riippuu tarkasteltavan kohteen korkeudesta maanpinnasta sekä maaston rosoisuudesta rakenteen sekä tuulensuunnan välissä.

Taulukko 12: Maastoluokat ja maastoparametrit (SFS-EN 1991-1-4 s. 36)

Maastoluokka	z_0 m	z_{min} m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvät metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10

Standardin kansallisessa liitteessä esitetään tarkemmin myös tapaukset, joissa tarkasteltavan rakenteen läheisyydessä on suuria tai huomattavasti korkeampia rakenteita tai, kun rakenteen lähellä on muita rakennuksia tai muita esteitä.

Rakenteille haitallisin tuulikuorman muoto on puuskanopeuspaine $q_p(z)$. Puuskanopeuspaine sisältää tuulennopeuden modifioitun perusarvon sekä lyhytaikaisen nopeusvaihteluiden vaikutukset. Puuskapaine voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

ρ on ilman tiheys, joka on riippuvainen muun muassa lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Suositusarvo on 1.25 kg/m^3

$I_v(z)$ on tuulenpuuskan intensiteetti korkeudella z

$c_e(z)$ on altistuskertoimen joka lasketaan kaavasta $c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$

q_p on kaavan $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$ mukainen nopeuspaineen perusarvo

Rakenteelle voidaan määrittää, rakenteesta ja tilanteesta riippuen, eri voimakertoimia c_f . Voimakertoimeen vaikuttaa muun muassa rakenteen hoikkuus ja muoto. Kertoimen laskemisessa on huomioitu kitkan ja tuulen pyörteisyyden, jotka aiheuttavat lisävastusta ilman virtaukseen. Paine kertoimia käytetään usein vain erillisten rakenteenosien mitoittamiseen, mutta tarvittaessa voidaan laskea rakenteen kokonaistuulivoima.

Voimakertoimen suorakaiteen muotoisille rakenneosille voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

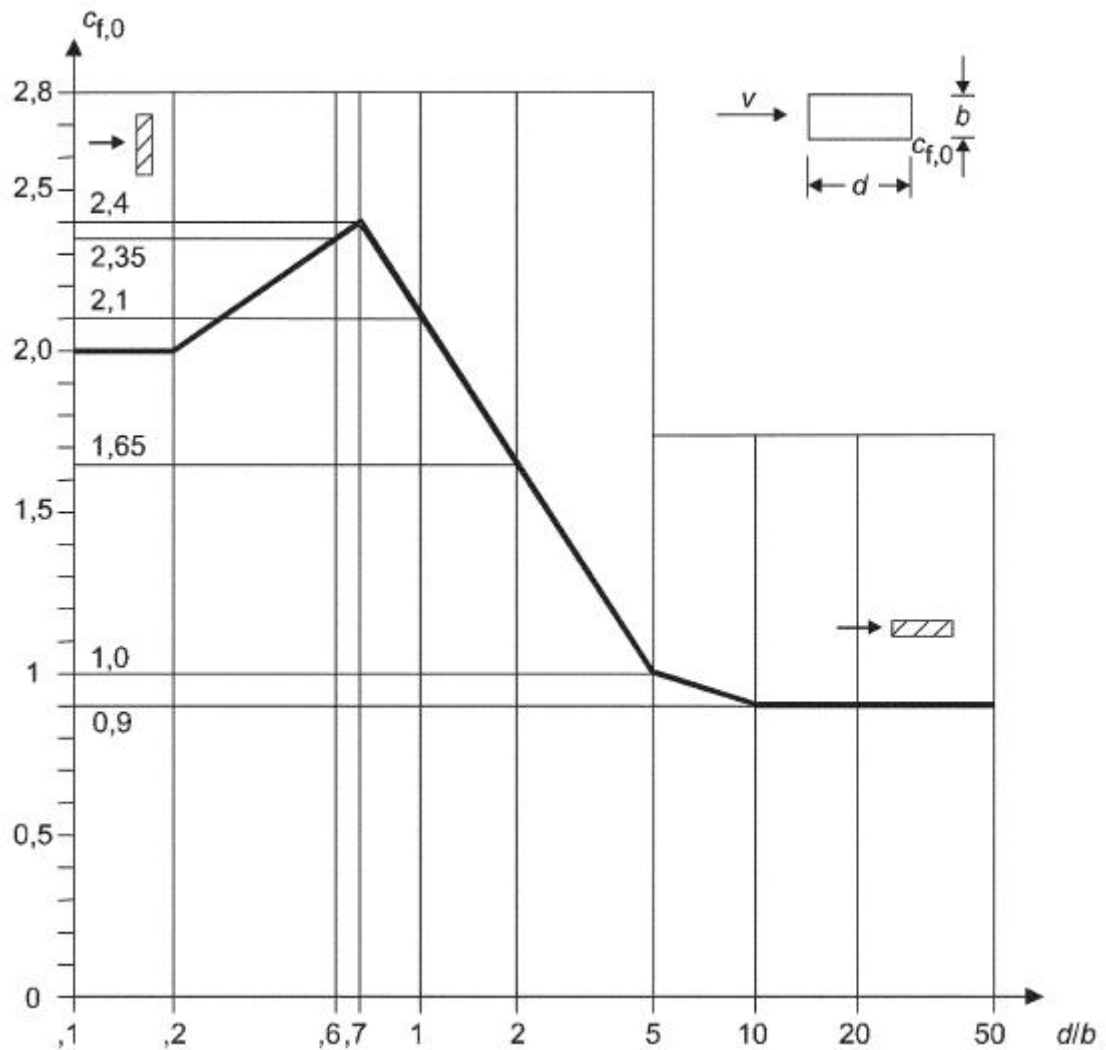
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda$$

missä:

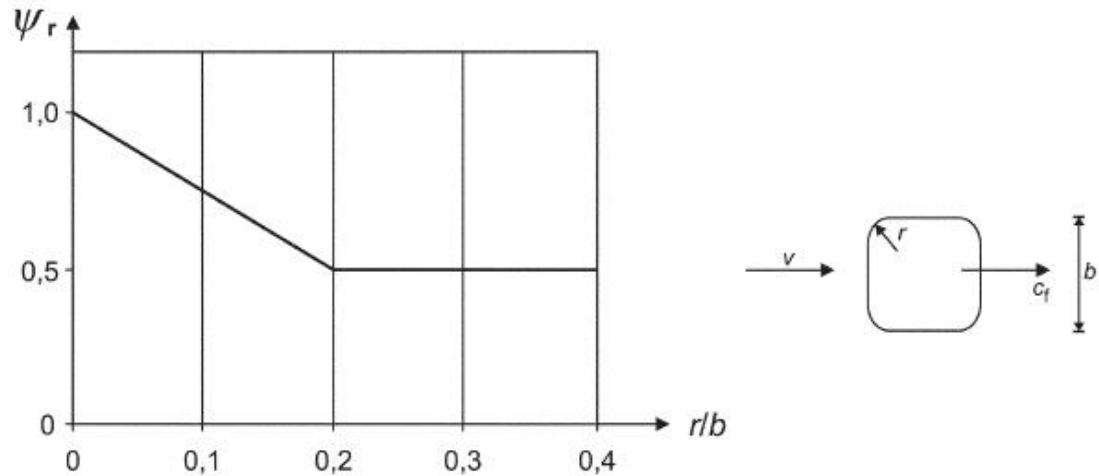
$c_{f,0}$ on terävsärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen voimakerroin, joka saadaan kuvan 3 käyrästä

ψ_r on pyöreäsärmäisen neliöpoikkileikkauksen pienennyskerroin, jonka arvo saadaan kansallisesta liitteestä. Kuvassa 4 esitetään pienennyskerroimen suositeltavat yläraja-arvot

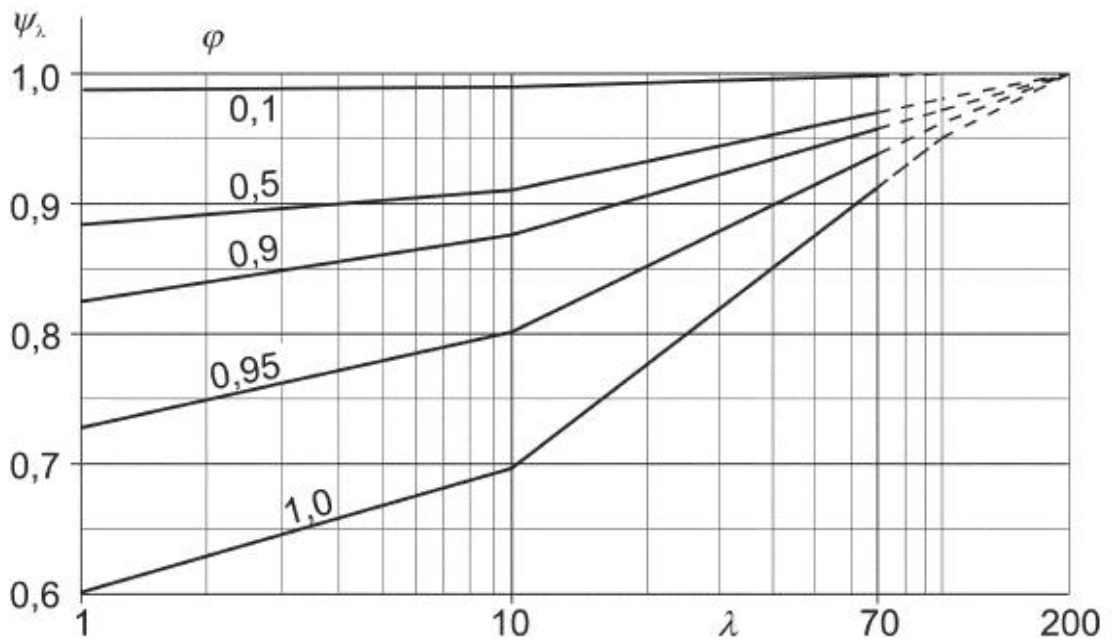
ψ_λ on rakenneosan päävaikutuskerroin, jolle saadaan suuntaa antava arvo kuvan 5 käyrästä.



Kuva 4: Terävsärmäisen suorakaidepoikkileikkauksen voimakerroin $c_{f,0}$, kun vapaan pään ohittava virtaus jätetään huomiotta (SFS-EN 1991-1-4 s. 114)

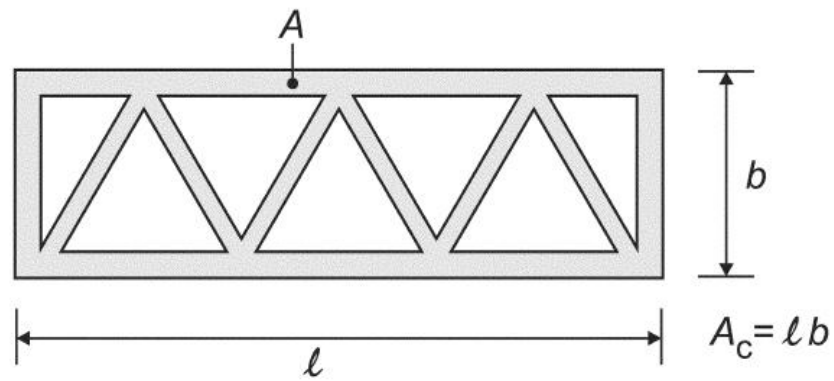


Kuva 5: Pienennyskerroin ψ_r neliöpoikkileikkaukselle, jonka särmät on pyöristetty (SFS-EN 1991-1-4 s. 114)



Kuva 6: Päätevaikutuskertoimen ψ_λ suuntaa-antavia arvoja tehollisen hoikkuuden λ funktiona eheyssuhteen φ eri arvoilla. (SFS-EN 1991-1-4 s. 140)

Eheyssuhde $\varphi = \frac{A}{A_c}$, jossa A on sauvojen projektioalojen summa ja A_c on reunaviivan rajaama pinta-ala.



Kuva 7: Eheyssuhde φ (SFS-EN 1991-1-4 s. 140)

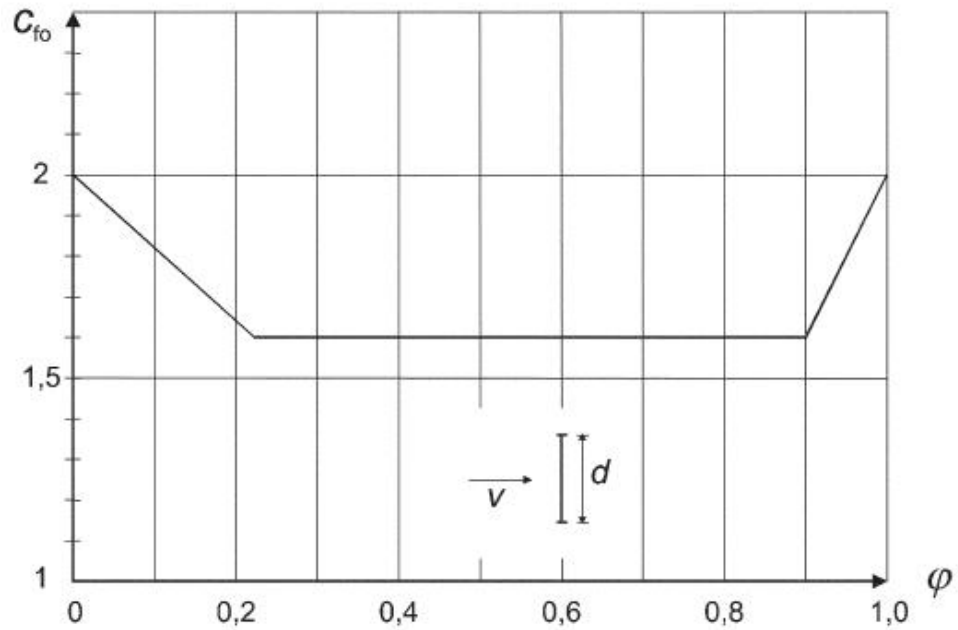
Ristikkorakenteille ja telineille voimakerroin lasketaan kaavasta

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda$$

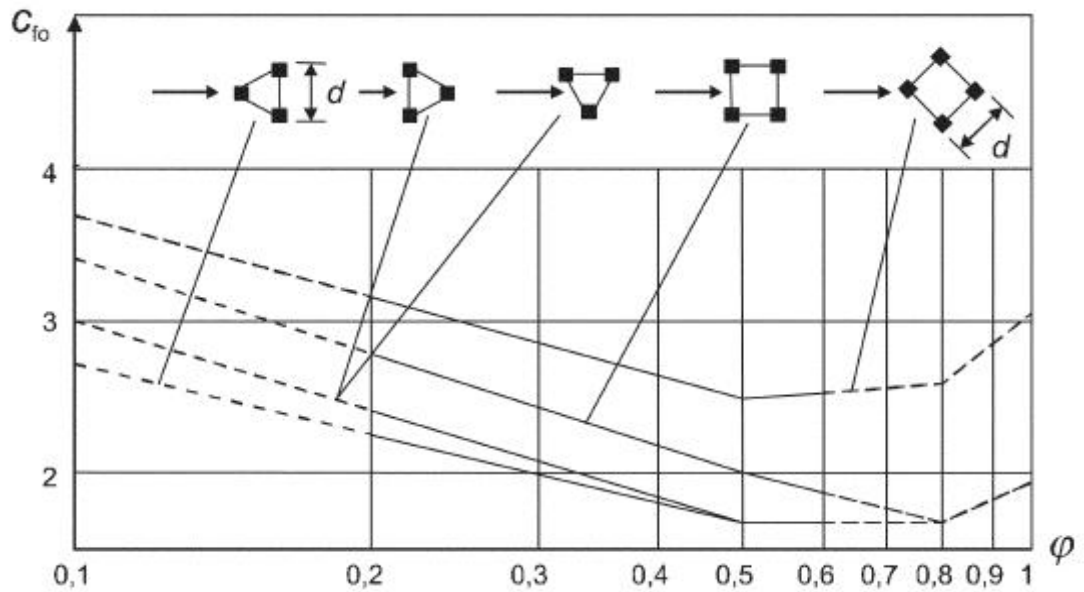
missä:

$c_{f,0}$ on ristikkorakenteiden ja telineiden voimakerroin, jonka arvo voidaan katsoa kuvista 34...36

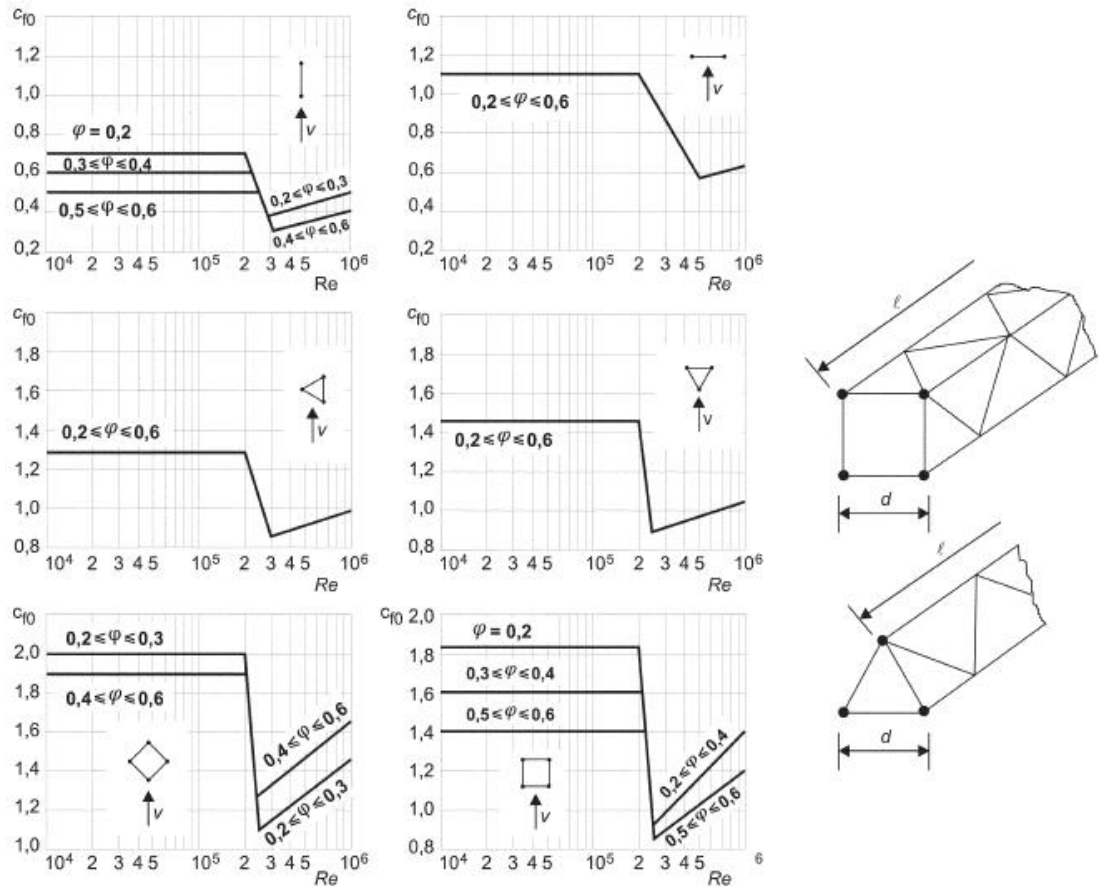
ψ_λ on päätevaikutuskerroin laskettuna rakenteen hoikkuuden λ funktiona käyttäen rakenteen pituutta ja leveyttä (katso kuva 5).



Kuva 8: Voimakerroin $c_{f,0}$ terävsärmäisistä sauvoista muodostetulle tasoristikkorakenteelle eheyssuhteen φ funktiona (SFS-EN 1991-1-4 s. 132)



Kuva 9: Voimakerroin $c_{f,0}$ terävsärmäisistä sauvoista muodostetulle avaruusristikkorakenteelle eheyssuhteen φ funktiona (SFS-EN 1991-1-4 s. 132)



Kuva 10: Voimakerroin $c_{f,0}$ pyöreistä sauvoista muodostetulle taso- ja avaruusristikkorakenteelle (SFS-EN 1991-1-4 s. 134)

Kansallisissa liitteissä tarkennetaan edellä mainittuja perusarvoja ja lausekkeita, muun muassa maastoluokkia ja niiden välistä rajanvetoa.

Porin alueella käytetään tuulikuormalle arvoa 1000 N/m. Tämä perustuu aikaisempiin vastaaviin laskelmiin. Tämä arvo olettaa, että tuuli vaikuttaa rakenteeseen vapaasti jostakin 8:sta tuulensuunnasta.

3.3.5 SFS-EN 1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu.

Standardi EN 1993-1-8 keskittyy liitosten suunnitteluun ja tarkasteluun. Standardissa käsitellään muun muassa ruuvi, niitti ja niveltappiliitokset sekä hitsauskiinnitykset. Putkisilloissa käytetään pelkästään hitsausliitoksia, joten tässä kappaleessa keskitytään vain niihin. Eri profiilien liitoksista keskitytään putkisilloissa yleisimmin käytettyihin rakenneputkiin. Standardissa liitosten tarkastelu rajoittuu staattisesti kuormitettujen liitosten mitoittamiseen. Kun suunnitellaan rakenteen liitoksia, tulee varmistua, että kaikki liitokset täyttävät kestävyys osalta standardien EN 1993-1-1 sekä 1993-1-8

mukaiset perusvaatimukset. Liitoksiin vaikuttavat voimat ja momentit lasketaan standardin EN 1993-1-1 mukaan.

Standardin sääntöjä voidaan soveltaa standardin EN 1993-1-1 mukaisille hitsattaville rakenneteräksille, joiden ainepaksuus on vähintään 4 mm, ohuempien ainepaksuuksien hitsaamista viitataan standardissa EN 1993-1-1. Hitsauksessa käytettävä lisäaineen tulee olla ominaisuuksiltaan vähintään perusaineen vastaavia arvoja. Standardissa käsiteltävät säännöt koskevat piena-, kolopiena-, päittäis-, tulppa- ja pyöröterästen kylkihitsien mitoitus. Jokaiselle näistä hitseistä käydään läpi niiden perustiedot sekä hitsien kestävyysmitoitusravot.

Standardissa käsitellään myös soveltamissääntöjä taso- ja avaruusristikoiden liitosten kestävyysmitoitukseksi. Rakenneputkien välisille liitoksille on asetettu soveltamiseksi, jotka rakenteen tulee täyttää, jotta standardin soveltamissääntöjä voidaan käyttää. Soveltamiseksi ovat seuraavat (SFS-EN 1991-1-8 s. 110-111):

1. Sauvojen puristettujen taso-osien tulee täyttää standardissa EN 1993-1-1 esitetyt vaatimukset poikkileikkausluokille 1 tai 2.
2. Paarteiden ja uumasauvojen sekä viereisten uumasauvojen välinen kulma tulee olla vähintään 30° .
3. Liitoksessa kohtaavien sauvojen päät kiinnitetään niin, että poikkileikkausten muoto ei muutu.
4. Hitsien tekeminen vaatii riittävän tilan liitoksen uumasauvojen välillä, jonka tulee olla vähintään $t_1 + t_2$
5. Jotta limitetyt liitokset siirtävät riittävästi leikkausvoimaa tulee limityksen olla vähintään 25 %
6. Limitetyissä liitoksissa joissa sauvojen paksuudet ja /tai teräslajit ovat erilaisia, pienemmän seinämäpaksuuden tai myötörajan omaava sauva asetetaan päällimmäiseksi.
7. Jos uumasauvojen leveys on eri limitettävillä sauvoilla, kapeampi sauva asetetaan päällimmäiseksi.

Soveltamissääntöjä ovat seuraavat (SFS-EN 1991-1-8 s. 110):

1. Kuumavalssatun ja kylmämuovattun rakenneputken nimellinen myötöraja ei saa ylittää arvoa 460 N/mm^2 . Kun nimellinen myötöraja valmiissa rakenteessa ylittää 355 N/mm^2 , staattisten kestävyysmitoitusravot lisätään kerroin 0,9.
2. Rakenneputken seinämäpaksuuden tulee olla vähintään 2.5mm.
3. Paarteen seinämäpaksuus ei saa ylittää 25mm paksuutta.

Standardissa 1993-1-1 esitetään paarre- ja uumasauvoille sisäisten aksiaalisten voimien mitoitusmitoitusravot, jotka eivät saa ylittyä. Standardissa 1991-1-8 esitetään myös murtorajatilassa liitosten kestävyysmitoitusravot (kohdissa 7.4, 7.5 ja 7.6), joita

uumasauvojen sisäisten aksiaalisten voimien mitoitusarvot eivät saa ylittää. Paarteen jännitykset $\sigma_{0,Ed}$ ja $\sigma_{p,Ed}$ lasketaan seuraavista kaavoista:

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}$$

missä:

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_{i>0} N_{i,Ed} \cos \theta_i.$$

Rakenneputkien välisissä liitoksissa esiintyviä murtumismuotoja ovat paarteen pinnan murtuminen, paarteen sivun murtuminen, paarteen leikkausmurtuminen, rakenneputken pinnan lävistysleikkautuminen, uumasauvan murtuminen sekä rakenneputken paikallinen lommahtaminen. Jokaisesta näistä tilanteesta on esitetty kuvallinen esimerkki standardin sivulla 115.

Uumasauvojen ja parresauvojen väliset hitsit tulee mitoittaa siten, että hitsi kestää myös epätasaiset jännitysjaumat ja omaa riittävän muodonmuutoskyvyn taivutusmomenttien uudelleenjakautumiseksi. Liitoksissa käytetään hitsinä joko päittäishitsiä, pienahitsiä tai niiden yhdistelmiä, jotka kiertävät koko rakenneputken piirin. Jos uumasauvan liitokseen kohdistuu yhdistetty taivutus sekä aksiaalinen voima tulee tarkistaa, että seuraava ehto toteutuu.

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left[\frac{|M_{ip,i,Ed}|}{M_{ip,i,Rd}} \right]^2 + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0$$

missä:

$M_{ip,i,Rd}$	on taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{ip,i,Ed}$	on sisäisen momentin mitoitusarvo
$M_{op,i,Rd}$	on taivutuskestävyyden mitoitusarvo kohtisuoraan ristikon tasoa vaste
$M_{op,i,Ed}$	on sisäisen momentin mitoitusarvo kohtisuoraan ristikon tasoa vasten.

Jos liitokset täyttävät taulukon 13 mukaiset pätevyysrajat, liitoksille riittää taulukossa esitettyjen mitoitusarvojen tarkastelu. Jos ehdot eivät täyty, tulee tarkistaa aiemmin mainitut murtumismuodot liitokselle.

Taulukko 13: Pyöreiden ja suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten parresauvojen välisten hitsausliitosten pätevyysrajat (SFS-EN 1993-1-8 s. 127)

Liitostyyppi	Liitosparametrit [$i = 1$ tai 2 , $j =$ limitetty uumasauva]					
	b_i/b_0 tai d_i/b_0	b_i/t_i ja h_i/t_i tai d_i/t_i		h_0/b_0 ja h_i/b_i	b_0/t_0 Ja h_0/t_0	Vapaavälinen tai limitetty liitos b_i/b_j
		Puristus	Veto			
T, Y tai X	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/t_i \leq 35$ ja $h_i/t_i \leq 35$	$b_i/t_i \leq 35$ ja $h_i/t_i \leq 35$	$\geq 0,5$ mutta $\leq 2,0$	≤ 35 ja Poikkileikkausluokka 2	–
Vapaavälinen K-liitos	$b_i/b_0 \geq 0,35$ ja $\geq 0,1 + 0,01 b_0/t_0$	ja Poikkileikkausluokka 2			≤ 35 ja Poikkileikkausluokka 2	$g/b_0 \geq 0,5(1 - \beta)$ mutta $\leq 1,5(1 - \beta)$ ¹⁾
Vapaavälinen N-liitos						kuitenkin vähintään $g \geq t_1 + t_2$
Limitetty K-liitos	$b_i/b_0 \geq 0,25$	Poikkileikkausluokka 1				Poikkileikkausluokka 2
Limitetty N-liitos						
Pyöreä uumasauva	$d_i/b_0 \geq 0,4$ mutta $\leq 0,8$	Poikkileikkausluokka 1	$d_i/t_i \leq 50$	Kuten edellä, mutta b_i korvataan d_i :llä ja b_j korvataan d_j :llä.		

¹⁾ Jos $g/b_0 > 1,5(1 - \beta)$ ja $g > t_1 + t_2$ liitosta käsitellään kahtena erillisenä T- tai Y-liitoksena.

²⁾ Limitystä voidaan kasvattaa, jotta limitetyn uumasauvan reuna voidaan hitsata parresauvaan.

Yksitasoisille vahvistamattomille liitoksille on asetettu rajoitus, jossa aksiaalisten voimien alaisten uumasauvojen aksiaalisen voiman mitoitusarvo $N_{i,Ed}$ ei saa olla suurempi, kuin hitsatun liitoksen aksiaalisen kestävyysmitoitussarvo $N_{i,Rd}$. Neliön muotoisten uumasauvojen ja parresauvojen välisten hitsausliitosten tulee täyttää taulukon 13 mukaiset pätevyysrajat sekä täyttää taulukon 14 mukaiset ehdot. Taulukosta 15 voidaan selvittää aksiaalisen kestävyysmitoitussarvo. Liitos, joka täyttää taulukon 14 vaatimukset, riittää paarteiden pinnan murtumisen sekä uumasauvan murtumisen tarkasteleminen käyttäen pienennettyä tehollista leveyttä. Suorakaiteen muotoisten parresauvan ja uumasauvan väliselle hitsausliitokselle, taulukon 13 mukaisella pätevyysalueella, voidaan määrittää aksiaalisen kestävyysmitoitussarvo tapauksesta riippuen käyttämällä joko taulukkoa 16 tai taulukkoa 17.

Taulukko 14: lisäehdot taulukon 16 käyttöön (SFS-EN 1993-1-8 s. 128)

Uumasauva	Liitostyyppi	Liitosparametrit	
Neliön muotoinen rakenneputki	T, Y tai X	$b_1/b_0 \leq 0,85$	$b_0/t_0 \geq 10$
	Vapaavälinen K tai N	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$b_0/t_0 \geq 15$
Pyöreä rakenneputki	T, Y tai X		$b_0/t_0 \geq 10$
	Vapaavälinen K tai N	$0,6 \leq \frac{d_1 + d_2}{2d_1} \leq 1,3$	$b_0/t_0 \geq 15$

Uumasauvojen liitoksia joita rasittaa yhdistetty taivutus ja aksiaalinen voima mitoitetaan siten, että toteutuu seuraava ehto:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0$$

missä:

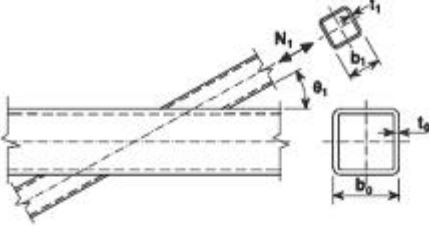
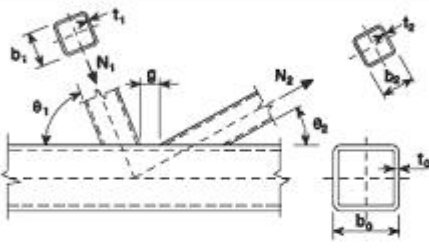
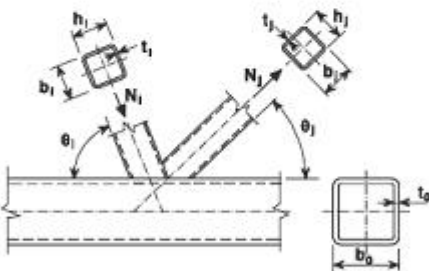
$M_{ip,i,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$M_{ip,i,Ed}$ on sisäisen momentin mitoitusarvo

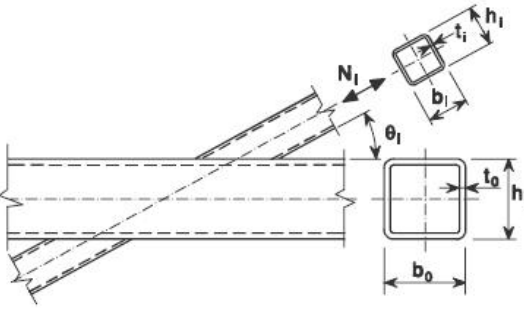
$M_{op,i,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo kohtisuoraan ristikon tasoa vaste

$M_{op,i,Ed}$ on sisäisen momentin mitoitusarvo kohtisuoraan ristikon tasoa vasten.

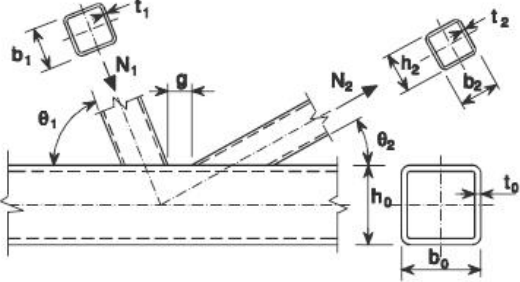
Taulukko 15: Neliön muotoisten rakenneputkien välisten hitsattujen liitosten aksiaalisten kestävyyskennoitusarvot (SFS-EN 1993-1-8 s. 128-129)

Liitostyyppi	Kestävyyden mitoitussarvo [$i = 1$ tai 2 , $j =$ limitetty uumasauva]
T-, Y- ja X-liitokset	Paarteen pinnan murtuminen $\beta \leq 0,85$
	$N_{i,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_i} \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_i} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$
Vapaaväliset K- ja N- liitokset	Paarteen pinnan murtuminen $\beta \leq 1,0$
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_i} \left(\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right) / \gamma_{M5}$
Limitetyt K- ja N- liitokset *)	Uumasauvan murtuminen $25\% \leq \lambda_{ov} < 50\%$
Sauvat i tai j voivat olla joko vedettyjä tai puristettuja, mutta yksi on vedetty ja toinen puristettu. ¹⁾	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \left(b_{eff} + b_{e,ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} (2h_i - 4t_i) \right) / \gamma_{M5}$
	Uumasauvan murtuminen $50\% \leq \lambda_{ov} < 80\%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i [b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i] / \gamma_{M5}$
	Uumasauvan murtuminen $\lambda_{ov} \geq 80\%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i [b_i + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i] / \gamma_{M5}$
Parametrit b_{eff} , $b_{e,ov}$ ja k_n	
$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i \quad \text{mutta } b_{eff} \leq b_i$	Kun $n > 0$ (puristus): $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ mutta $k_n \leq 1,0$
$b_{e,ov} = \frac{10}{b_j/t_j} \frac{f_{y0} t_j}{f_{yi} t_i} b_i \quad \text{mutta } b_{e,ov} \leq b_i$	
	Kun $n \leq 0$ (veto): $k_n = 1,0$
Pyöreiden uumasauvojen tapauksessa edellä olevat kestävyyskerrotaan suurella $\pi/4$, suureet b_1 ja h_1 korvataan suurella d_1 ja suureet b_2 ja h_2 korvataan suurella d_2 .	
*) Vain limitetty uumasauva i tarvitsee tarkistaa. Limitetyn uumasauvan j hyväksikäyttöaste (so. liitoksen kestävyyskennoitusarvo jaettuna uumasauvan poikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisella poikkileikkauksen kestävyyskennoitusarvolla) valitaan yhtä suureksi kuin limitetyn uumasauvan hyväksikäyttöaste.	

Taulukko 16: Suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten paarresauvojen välisten hitsattujen T-, X- ja Y-liitosten aksiaalisten kestävyysien mitoitusarvot (SFS-EN 1993-1-8 s. 130)

Liitostyyppi	Kestävyyden mitoitusarvo [$i = 1$]
	Paarteen pinnan murtuminen $\beta \leq 0,85$
	$N_{i,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_i} \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_i} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$
	Paarteen sivun lommahtaminen ¹⁾ $\beta = 1,0$ ²⁾
	$N_{i,Rd} = \frac{f_b t_0}{\sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + 10t_0 \right) / \gamma_{M5}$
	Uumasauvan murtuminen $\beta \geq 0,85$
	$N_{i,Rd} = f_{yt_i} (2h_i - 4t_i + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$
	Lävistysleikkautuminen $0,85 \leq \beta \leq (1 - 1/\gamma)$
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + 2b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$
¹⁾ X- liitoksille, joille $\theta < 90^\circ$ käytetään pienempää seuraavista arvoista: tämä arvo ja taulukossa 7.12 vapaavälisille K- ja N- liitoksille esitetty paarteen sivuseinän leikkauskestävyyden mitoitusarvo. ²⁾ Kun $0,85 \leq \beta \leq 1,0$, käytetään lineaarista interpolointia seuraavien arvojen välillä: paarresauvan pinnan murtuminen, kun $\beta = 0,85$ ja määräävin seuraavista arvoista: paarresauvan sivun murtuminen, kun $\beta = 1,0$ (joko sivun lommahdus tai paarteen leikkautuminen).	
Pyöreiden uumasauvojen tapauksessa, edellä mainitut kestävyysarvot kerrotaan luvulla $\pi/4$ sekä suureet b_1 ja h_1 korvataan suureella d_1 ja suureet b_2 ja h_2 korvataan suureella d_2 .	
Veto: $f_b = f_{y0}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yt_i} t_i} b_i \quad \text{mutta } b_{eff} \leq b_i$
Puristus: $f_b = \chi f_{y0}$ (T- ja Y- liitokset) $f_b = 0,8 \chi f_{y0} \sin \theta_i$ (X- liitokset)	$b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} b_i \quad \text{mutta } b_{e,p} \leq b_i$
missä χ pienennystekijä, joka ottaa huomioon taivutusnurjahduksen ja joka määritetään EN 1993-1-1:n mukaan käyttäen kyseeseen tulevaa nurjahduskäyrää ja normalisoitua muunnettua hoikkuutta $\bar{\lambda}$, joka lasketaan kaavasta: $\bar{\lambda} = 3,46 \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{\sin \theta_i}}}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}}$	Kun $n > 0$ (puristus): $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ mutta $k_n \leq 1,0$ Kun $n \leq 0$ (veto): $k_n = 1,0$

Taulukko 17: Suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten paarresauvojen välisten hitsattujen K- ja N-liitosten aksiaalisten kestävyysien mitoitusarvot (SFS-EN 1993-1-8 s. 131)

Liitostyyppi	Kestävyyden mitoitusarvo [$i = 1$ tai 2]
Vapaaväliset K- ja N- liitokset	Paarteen pinnan murtuminen
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right) / \gamma_{M5}$
	Paarteen leikkautuminen
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$
	$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$
	Uumasauvan murtuminen
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$
Limitetyt K- ja N- liitokset	Lävistysleikkautuminen $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$
	Kuten taulukossa 7.10.
Pyöreiden uumasauvojen tapauksessa edellä mainitut kestävyysien arvot kerrotaan luvulla $\pi/4$ sekä suuret b_1 ja h_1 korvataan suurella d_1 ja suuret b_2 ja h_2 korvataan suurella d_2 .	
$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) t_0$ <p>Neliön tai suorakaiteen muotoiselle uumasauvalle:</p> $\alpha = \sqrt{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}$ <p>Missä g on vapaaväli, ks. kuva 1.3(a).</p> <p>Pyöreälle uumasauvalle: $\alpha = 0$</p>	$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i \quad \text{mutta } b_{eff} \leq b_i$
	$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i \quad \text{mutta } b_{e,p} \leq b_i$
	<p>Kun $n > 0$ (puristus):</p> $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ <p>mutta $k_n \leq 1,0$</p> <p>Kun $n \leq 0$ (veto):</p> $k_n = 1,0$

Vahvistetuille liitoksille tarkoitetaan usein liitosta, jossa rakenneputket eivät ole suorassa kosketuksessa, vaan näiden välillä on laippa, jolla pyritään kasvattamaan murtumiskestävyyttä. Vahvistustapa riippuu murtumismuodosta, joka on määräävä liitoksen kestävyysien mitoitusarvolle. Standardissa esitetään taulukot 7.17 ja 7.18 (s. 137-139), joiden mukaan määritetään vahvistettujen liitosten mitoitusarvot.

3.4 Suomen rakentamismääräyskokoelman standardit

Rakentamismääräyskokoelman B osa liittyy rakenteiden lujuuden laskemiseen. B1 sisältää rakenteiden varmuuden ja kuormituksen laskemisessa käytettäviä yleisiä suunnitteluperusteita, termejä, taulukoita sekä yhtälöitä. B7 sisältää rakenteiden suunnittelussa käytettäviä tietoja ja ehtoja yksityiskohtaisemmin.

3.4.1 B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräykset

Tämän otsikon alla käydään läpi rakentamismääräyskokoelman B1 osan putkisillan suunnittelussa hyödylliset kohdat.

Rakennuslaissa on säädetty rakennuksen rakentamisen ja käytön ajalle määräykset, joihin rakennukseen kohdistuvat kuormitukset eivät saa johtaa. Näitä ovat kuormituksesta johtuva, koko rakenteen tai sen osan sortuminen, liian suuret muodonmuutokset jotka voisivat esimerkiksi vaurioittaa laitteita tai kiinteitä varusteita.

Suunniteltava rakenne tulee mitoittaa siten, että rakenteella on riittävä varmuus murtumista vastaan. Rakenteella tulee olla myös riittävästi varmuutta haitallisia muodonmuutoksia, halkeamia, värähtelyjä, painumia tai muita haitallisia vaikutuksia vastaan normaalissa käytössä. Rakenteeseen vaikuttavia kuormituksia tarkasteltaessa, tulee huomioida myös ympäristön vaikutukset.

Rakenteen mitoituksessa tarkastellaan yleensä rakenteen rajatiloja jotka ovat murtorajatila sekä käyttörajatila. Rajatila tarkastelussa käytetään rakenteen mittoina nimellismittoja, kuormina ominaiskuormista saatuja laskentakuormia sekä materiaalin ominaislujuuksista saatuja laskentalujuuksia. Murtorajatilatarkastelu osoittaa aiheutuuko laskentakuormista rakenteelle rasituksia jotka ylittävät rakenteen tai rakenteenosan kestävyys. Käyttörajatilatarkastelussa tutkitaan ominaiskuormista aiheutuvia muodonmuutoksia sekä halkeamia, jotka eivät saa ylittää annettuja rajoja tai vaikuta muihin rakenteen osiin haitallisesti. Tarvittava varmuus rajatilatarkasteluissa saavutetaan osavarmuuskerroinmenetelmällä, jossa osavarmuuskerroin on määritelty siten, että vaurioitumistodennäköisyys on riittävän pieni. Murtorajatilatarkasteluissa saadaan rakenteen laskentakuorma F_d seuraavasta lausekkeesta:

$$F_d = \begin{cases} 1,2 \\ 0,9 \end{cases} g + 1,6q_k + 1,6q_{k,lumi} + \Sigma 0,8q_k$$

(tuuli)

Varmuuskerroin q_k saadaan seuraavasta taulukosta.

Taulukko 18: Kuormien osavarmuuskertoimet murtorajatarkastelussa (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 4)

Kuorma		Osavarmuuskertoin
Pysyvä kuorma	$g^{1)}$	1,2 tai 0,9
Yksi muuttuva kuorma, joka ei ole lumi- tai tuulikuorma	q_k	1,6
Lumi- tai tuulikuorma	$q_{k,lumi}$ (tuuli)	1,6
Muut muuttuvat kuormat	q_k	0,8

¹⁾ Rinnakkaisista pysyvän kuorman kertoimista valitaan koko rakenteelle se, joka antaa määrävän vaikutuksen.

Laskentakuorma q_d , jota käytetään käyttörajatilatarkastelussa, määritellään kaavasta

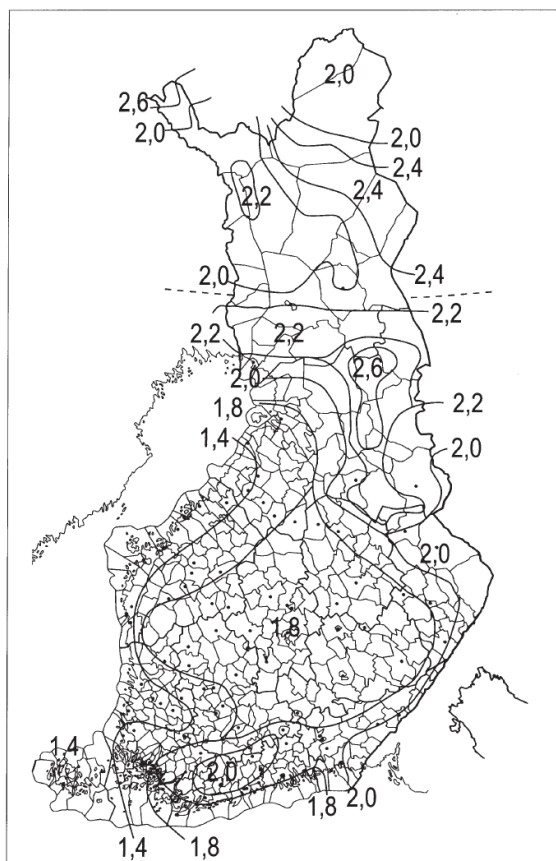
$$q_d = g + q_k + q_{k,lumi} + \Sigma 0,5q_k$$

(tuuli)

Tätä kaavaa käytetään myös sallittujen jännitysten menettelyssä laskentakuorman vaarallisimman kuormayhdistelmän selvittämiseen mitoittaessa rakenteen sallittuja jännityksiä. Mitoituksessa tulee huomioida, että jännityksille ja muodonmuutokselle määritettyjä sallittuja arvoja ei saa ylittää. Sama kaava on myös käytössä kokonaisvarmuusmenetelmässä. Kokonaisvarmuusmenetelmässä rakenne mitoitetaan siten, että vaadittua kokonaisvarmuuskerrointa ei aliteta.

Rakentamismääräyskokoelmassa lumikuorma lasketaan vuotuisten enimmäisarvojen perusteella. Peruslumikuormalle s_k saadaan arvo kuvasta 10, jonka lukuarvot ovat katsottu vaakasuoralle katolle. Rakenne jonka korkeus on yli 20 m sekä alttiina kaikista suunnista vaikuttavalle tuulelle eikä lumen ole mahdollista kinostua, voidaan lumikuormaan tehdä 25 %:n vähennys.

Rakenteeseen vaikuttava tuulikuorma lasketaan havaittujen tuulen nopeuksien perusteella käyttäen rakenteen muodosta sekä tuulen suunnasta riippuvia kertoimia. Tuulen nopeuspaineen suuruuteen vaikuttavat ympäröivän maaston maastoluokka sekä rakenteen korkeus. Nopeuspaine eri maastoluokissa saadaan joko taulukosta 19 tai kuvasta 11.



Kuva 11: Kattojen peruslumikuormat s_k (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 8)

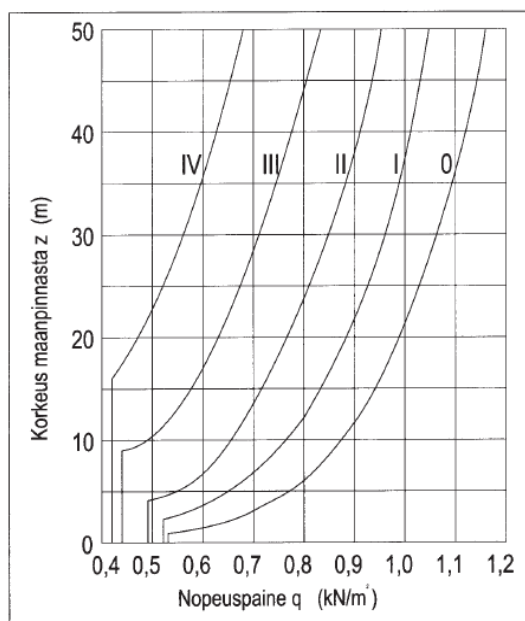
Taulukko 19: Nopeuspaine eri maastoluokissa (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 10)

Maastoluokka	z_{\min} (m)	Nopeuspaine (kN/m ²)
O Avomeri	1	$q = 0,87 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,18}$
I Laaja avoin maa-alue tai järvenselkä	2	$q = 0,77 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,20}$
II Maatalousmaa, satunnaisia pieniä esteitä kuten yksittäisiä rakennuksia, pensaikkoja ja puita	4	$q = 0,65 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,24}$
III Esikaupunki- ja teollisuus-alueet, metsät, pientaloalueet, vaihtelevat viljelysalueet, joissa on maanilarakennuksia ja metsäsaarekkeitä	8	$q = 0,49 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,32}$
IV Kaupunkien keskusta-alueet, rakennusten keskimääräinen korkeus yli 15 m	16	$q = 0,34 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,44}$

z on korkeus maaston pinnasta metreinä

Kaavat ovat voimassa kun korkeus $z \leq 200$ m.

Nopeuspaine on vakio korkeudesta z_{\min} maaston pintaan (z_{\min} :n mukainen).



Kuva 12: Nopeuspaine eri maastoluokissa (Suomen rakentamismääräyskokoelma B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset s. 10)

3.4.2 B7: Teräsrakenteet, ohjeet

Rakentamismääräyskokoelman osassa B7 käydään läpi teräsrakenteiden suunnittelua sekä mitoittamista. Seuraavassa käydään läpi kokoelmassa esitettyjä putkisillan suunnittelu prosessissa hyödyllisiä kohtia esitysjärjestyksessä.

Teräsrakenteet jaetaan kolmeen rakenneluokkaan jotka vastaavat eurokoodissa esitettyjä seuraamusluokkia. Luokat on jaoteltu mahdollisen vaurion aiheuttaman henkilövahinkojen vakavuuden sekä yhteiskunnallisen menetyksen perusteella. Taulukossa 20 esitetty luokittelu koskee rakenteen kantavaa runkoa ja sen osia.

Taulukko 20: Rakenneluokat (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 3)

Rakenne-luokka	Rakenne-esimerkkejä
1	Rakennukset, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten <ul style="list-style-type: none"> – vähintään 4-kerroksiset asuin-, konttori- ja liikerakennukset – konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot Teollisuuden raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rungot Erikoisrakenteet kuten <ul style="list-style-type: none"> – suuret mastot ja tornit
2	Rakennukset, jotka eivät kuulu luokkiin 1 tai 3
3	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten <ul style="list-style-type: none"> – pienet varastot – pienet maatalouden tuotantorakennukset

Kokoelmassa esitetään myös eurokoodissa esitetyt murto- sekä käyttörajatila. Rajatilat määritetään samalla tavalla niin kokoelmassa kuin eurokoodissa. Rakentamismääräyskokoelmassa murtorajalle annetaan lisä ehto taipumalle jota rakenne ei saa ylittää. Tämän arvo on $L/30$, jossa L tarkoittaa rakenteen jännemittaa. Käyttörajatilassa annetaan myös taipumalle rajatilat taulukon 21 mukaisesti.

Taulukko 21: Taipumien käyttörajatilat (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 9).

Rakenne	Taipuman rajatila
Välipohjien pääpalkit	L/400
Vesikattojen ja katoksien	
– pääpalkit	L/300
– orret ja muut vastaavat	L/200
Ulokkeet	L/150
Rakennuksen vaakasuora taipuma	
– 1 ja 2 kerroksiset rakennukset	H/150
– muut rakennukset	L/400
L on jänneväli H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	

Murtorajatilassa rakenteen laskentakuormitus F_d lasketaan seuraavasta kaavasta:

$$F_d = 1,2 \cdot g + 1,6 \cdot (q_{k1} + q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5 \cdot q_{ki})$$

Käyttörajatilassa laskentakuormitus lasketaan kaavasta:

$$F_d = g + q_{k1} + q_{k2} + \sum_{i=3}^n 0,5 \cdot q_{ki}$$


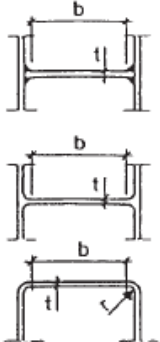
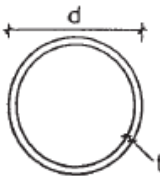
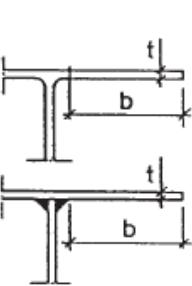
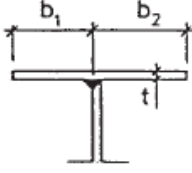
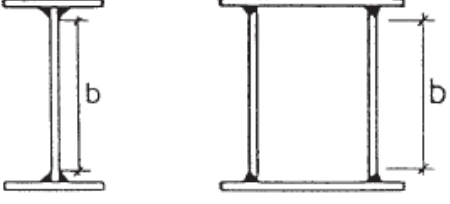
Kaavoissa käytetyt kirjaimet tarkoittavat seuraavaa:

- g on pysyvä kuorma
- q_{k1} on yksi muuttuva kuorma, joka ei ole lumi- eikä tuulikuorma
- q_{k2} on yksi muuttuva luonnonkuorma (lumi- tai tuulikuorma)
- q_{ki} on jokin muu muuttuva kuorma.

Poikkileikkausluokat määritellään kokoelmassa hieman eri lailla kuin eurokoodissa. Luokille on esitetty myös rajahoikkeudet, jotka esitetään kuvassa 12.

- Poikkileikkausluokka: sauvan oletetaan plastisoituvan ja ne omaavat riittävän kiertymis kyvyn.
- Poikkileikkausluokka: sauvan oletetaan plastisoituvan mutta kiertymäkyky on rajoitettu siten, että mekanismin muodostuminen ei ole mahdollista.
- Poikkileikkausluokka: sauvassa voi taivutuksessa rasitetuimmassa kohdassa esiintyä myötöpuristuma.

4. Poikkileikkausluokka: sauvojen kestävyiden laskennassa otetaan huomioon lommahduksen vaikutus

Rasitustila	Poikkileikkaus	Poikkileikkausluokkien rajahoikkeudet		
		1	2	3
Tasan jakautunut puristus 		$b/t \leq 1,10 \cdot \sqrt{E/f_y}$	$b/t \leq 1,20 \cdot \sqrt{E/f_y}$	$b/t \leq 1,37 \cdot \sqrt{E/f_y}$
Taivutus ja puristus 		$d/t \leq 0,056 \cdot E/f_y$	$d/t \leq 0,078 \cdot E/f_y$	$d/t \leq 0,112 \cdot E/f_y$
Tasan jakautunut puristus  b_1 ja b_2 mitataan hitsin keskelle		$b/t \leq 0,30 \cdot \sqrt{E/f_y}$	$b/t \leq 0,36 \cdot \sqrt{E/f_y}$	$b/t \leq 0,44 \cdot \sqrt{E/f_y}$
Taivutettu ja puristettu uuma 		Poikkileikkausluokka 1 $b/t \leq 2,40 \cdot (1 - 1,40 \cdot N/N_p) \cdot \sqrt{E/f_y}$, kun $N/N_p < 0,39$ $b/t \leq 1,10 \cdot \sqrt{E/f_y}$, kun $N/N_p \geq 0,39$ Poikkileikkausluokka 2 $b/t \leq 3,00 \cdot (1 - 1,60 \cdot N/N_p) \cdot \sqrt{E/f_y}$, kun $N/N_p < 0,125$ $b/t \leq 2,57 \cdot (1 - 0,53 \cdot N/N_p) \cdot \sqrt{E/f_y}$, kun $N/N_p \geq 0,125$ $N_p = f_y \cdot A$		

Kuva 13: Poikkileikkausluokkien rajahoikkeudet (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 11).

Rakentamismääräyskokoelmassa sauvalle määritetään kaavat vetokestävyydelle, puristuskestävyydelle, leikkausvoiman- sekä taivutusmomentin kestävyydelle.

Sauvan vetokestävyys N_{Rt} lasketaan kaavalla:

$$N_{Rt} = f_d \cdot A,$$

jossa f_d on sauvaan vaikuttava vetävä normaalivoima, sekä A sauvan määräävin pinta-ala joka lasketaan.

Kestävyys puristavalle normaalivoimalle voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$N_{Rc} = f_{cd} \cdot A_c = f_{ck} \cdot \frac{A_c}{\gamma_m}$$

jossa f_{cd} on sauvalle laskettu lujuus ja A_c on tehollinen poikkipinta-ala. Sauvan lujuus lasketaan käyttämällä seuraavia kaavoja:

$$f_{ck} = \left(\beta - \sqrt{\beta^2 - 1/\bar{\lambda}_k^2} \right) \cdot f_y$$

$$\beta = \frac{1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_k - 0,2) + \bar{\lambda}_k^2}{2\bar{\lambda}_k^2}$$

$$\bar{\lambda}_k = \sqrt{N_R/N_{el}}$$

Kun $\bar{\lambda}_k < 0,2$ voidaan olettaa, että $f_{ck} = f_y$. Jotta f_{ck} :n sekä β :n laskemisessa käytettävät kaavat ovat voimassa, kun $\bar{\lambda}_k \leq 3,5$.

$$N_R = f_d \cdot A$$




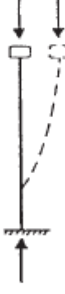

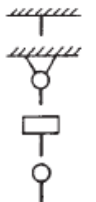
$$N_{el} = \frac{\pi^2 EA}{\gamma_m \bar{\lambda}_k^2} = \frac{N_R}{\bar{\lambda}_k^2}$$

Jos nurjahduspituutena käytetään arvoa $L_c = \gamma \cdot L$ (taulukko 22), lasketaan $\bar{\lambda}_k$ seuraavasta lausekkeesta:

$$\bar{\lambda}_k = \frac{\lambda_k}{\pi} \sqrt{f_y/E} = \frac{L_c}{i \cdot \pi} \cdot \sqrt{f_y/E}$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 EA}{\gamma_m \bar{\lambda}_k^2} = \frac{N_R}{\bar{\lambda}_k^2}$$

Taulukko 22: Nurjahtamispituudet (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 18).

Molemmista päistä nivelöity sauva	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty sauva	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty sauva	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty sauva Toinen kiinnityskohta sivusiirtävä	Toisesta päästä jäykästi ja toisesta päästä nivelöidysti kiinnitetty sauva
				
$\gamma = 1,0$	$\gamma = 2,1$	$\gamma = 0,6$	$\gamma = 1,2$	$\gamma = 0,8$
Sauvan pään reunaehdot		Kiertymä estetty Kiertymä vapaa Kiertymä estetty Kiertymä vapaa		Siirtymä estetty Siirtymä estetty Siirtymä vapaa Siirtymä vapaa

Jos $\bar{\lambda}_k < 0,2$ voidaan olettaa, että $f_{ek} = f_y$. Jotta f_{ck} sekä β voidaan laskea edellä mainituilla kaavoilla, tulee $\bar{\lambda}_k \leq 3,5$. β :n laskemisessa käytettävä termin α arvo voidaan selvittää nurjahdusluokasta (ks. taulukot 23 ja 24)

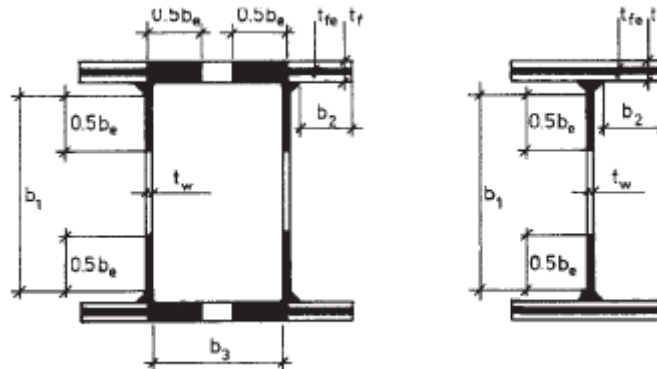
Taulukko 23: Nurjahdusluokat ja termi α (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 16).

Nurjahdusluokka	α
A	0,21
B	0,34
C	0,49
D	0,76

Taulukko 24: Nurjahdusluokkia (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 17).

Poikkileikkauksen muoto			Nurjahdusluokka
			B
Hitsattu kotelo	¹⁾ a tarkoittaa hitsin a-mittaa x-x: h_x, t_x y-y: h_y, t_y	$a^{1)} \leq t/2$ $a^{1)} > t/2$ $h/t > 30$	B B
		$a^{1)} > t/2$ $h/t \leq 30$	C
Umpiprofiili			C
Valssattu I-profiili	nurjahdus pienemmän jäykkyyden suunnassa (x-akselin suunta)	$h/b > 1,2$ $h/b \leq 1,2$	B C
nurjahdus suuremman jäykkyyden suunnassa (y-akselin suunta)		$h/b > 1,2$ $h/b \leq 1,2$	A B
Hitsattu I-profiili	nurjahdus pienemmän jäykkyyden suunnassa (x-akselin suunta)		C
nurjahdus suuremman jäykkyyden suunnassa (y-akselin suunta)			B
Valssattu profiili, hitsaamalla kiinnitetyt vahvistuslevyt		nurjahdus pienemmän jäykkyyden suunnassa (x-akselin suunta) nurjahdus suuremman jäykkyyden suunnassa (y-akselin suunta)	A B
T-profiili L-profiili Z-profiili U-profiili			C
Poikkileikkausosan suurimman paksuuden ollessa > 40 mm käytetään valssatuille tai hitsatuille kaksoissymmetrisille I-profiileille nurjahdusluokkaa D sekä x-x että y-y akselin suunnassa tapahtuvassa nurjahduksessa. Alkujännitysten vaikutus on otettu huomioon nurjahdusluokissa.			

Tehollinen poikkipinta-ala on samanarvoinen kuin määrävä pinta-ala, paitsi tilanteessa jossa sauvakuuluu 4. poikkileikkausluokkaan. Tällöin pinta-ala lasketaan tehollisten osien summana (tehollinen leveys b_e , tehollinen paksuus t_e , kuva 13).



Kuva 14: Tehollinen poikkileikkaus A_c , rasituksena keskeinen puristus (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 22)

Sauvan leikkauskestävyys V_R , poikkileikkausluokille 1 ja 2 voidaan laskea taulukon 25 avulla. Muissa tapauksissa käytetään kaavaa:

$$V_R = f_{vd} \cdot I \cdot \frac{t_w}{S},$$

jossa S on tarkasteltavana olevan kohdan ulkopuolelle jääneiden poikkileikkauspintojen staattinen momentti koko poikkileikkauspinnan painopiste akselin suhteen. Termi f_{vd} on leikkauslujuuden laskenta-arvo joka voidaan laskea kaavalla $f_{vd} = f_{vk} / \gamma_m$. Kaavan arvo f_{vk} lasketaan taulukosta 26 esitetyillä kaavoilla käyttäen muunnettua hoikkuutta

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / \tau_{el}},$$

jossa τ_{el} lasketaan kaavasta:

$$\tau_{el} = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2},$$

jossa

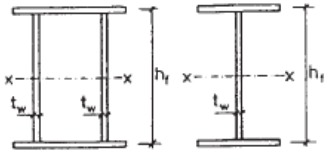
$$k = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 \text{ kun } a \geq b$$

tai

$$k = 5,34 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 + 4,00 \text{ kun } a \leq b,$$

jossa a on uuman pituus jäykisteiden välillä, sekä b on uuman korkeus.

Taulukko 25: Sauvan poikkileikkauksen kestävyys voimasuureyhdistelmille poikkileikkausluokissa 1 ja 2 (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 13).

Kaksoisymmetrinen poikkileikkaus, taivutus x-x -akselin suhteen	
	$A_{wl} = 2 \cdot h_t \cdot t_w$ (koteloprofiili) $A_{wl} = h_t \cdot t_w$ (I-profiili) $V_R = f_{vd} \cdot A_{wl}$
Yhteisvaikutusehto	Ehdon voimssaolo
a) $\frac{M}{M_{Rv}} + \frac{1}{1 - (1 - \delta)^2} \cdot \left(\frac{N}{N_{Rv}} \right)^2 \leq 1$ b) $\frac{M}{M_{Rv}} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) + \frac{N}{N_{Rv}} \leq 1,0$	$0 \leq \frac{N}{N_{Rv}} \leq \delta$ $\delta \leq \frac{N}{N_{Rv}} \leq 1,0$
Ehdoissa a) ja b) olevat termit lasketaan seuraavasti: $r = 1,0,$ kun $V/V_R \leq 1/3$ $r = \sqrt{1 - (V/V_R)^2},$ kun $V/V_R > 1/3$ $A_r = A - (1 - r) \cdot A_{wl}$ $\delta = r \cdot A_{wl} / A_r$ $N_{Rv} = A_r \cdot f_d$ $M_{Rv} = 0,25 \cdot (2 - \delta) \cdot h_t \cdot N_{Rv}$	

Taulukko 26: Leikkauslujuuden ominaisarvo f_{vk} (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 23).

Tuentatapa 1	Tuentatapa 2
a) $f_{vk} = 0,6 f_y,$ kun $\bar{\lambda}_p \leq 0,90$ b) $f_{vk} = (0,84 - 0,26 \cdot \bar{\lambda}_p) \cdot f_y,$ kun $0,9 < \bar{\lambda}_p \leq 1,60$ c) $f_{vk} = \frac{1,04 \cdot f_y}{\bar{\lambda}_p + 0,90},$ kun $1,60 < \bar{\lambda}_p \leq 5,0$	d) $f_{vk} = 0,6 f_y,$ kun $\bar{\lambda}_p \leq 0,90$ e) $f_{vk} = (0,84 - 0,26 \cdot \bar{\lambda}_p) \cdot f_y,$ kun $0,9 < \bar{\lambda}_p \leq 1,60$ f) $f_{vk} = \frac{0,67 \cdot f_y}{\bar{\lambda}_p},$ kun $1,60 < \bar{\lambda}_p \leq 5,0$

Taivutuskestävyys M_R , kun kiepahdus ei ole määräävä, lasketaan kaavalla:

$$M_R = \eta \cdot f_d \cdot W$$

jossa η lasketaan W_p/W poikkileikkausluokille 1 ja 2 mutta arvoltaan enintään 1,20, poikkileikkausluokassa 3 $\eta = 1,0$, poikkileikkausluokassa 4 $\eta = W_e/W$.

Koska putkisiltaan vaikuttaa usein tuulesta johtuva jatkuva värähtelyliike sekä lumi- ja tuulikuormasta johtuvat muuttuvat kuormat, luetaan putkisilta väsytytkuormitetuksi rakenteeksi. Tämä tarkoittaa, että rakennetta suunniteltaessa ei saa käyttää hyväksi ylikriittistä tilaa. Väsymistarkastelu voidaan jättää suorittamatta, jos jännitysvaihtelujen lukumäärä $N = 10^6 \cdot \left(\frac{36}{\Delta\sigma_{max}}\right)^3$, jossa $\Delta\sigma_{max}$ tarkoittaa jännitysvaihteluvälin suurinta arvoa. Putkisiltojen rakenne kootaan usein hitsaamalla. Rakentamismääräyskokoelman osa B7 käsittelee pääosin pulttiliitoksia, joten hitsausliitokset suunnitellaan sovellettavan standardin mukaan (SFS 1993-1-8), käyttäen taulukon 27 mukaisia ainevarmuuslukuja. Jännitysten laskennassa otetaan huomioon kimmoteorian mukainen jakautuminen tutkittavan kohdan osalta. Ominaisväsymisrajojen arvojen laskenta ottaa huomioon jännityshuiput, joten tämän osalta tarkastelu voidaan olettaa tehdyksi. Kaikenlaisia muutoksia, jotka vaikuttaisivat heikentävästi rakenteen väsymiskestävyyteen tai kuormien vaikutustapaan, tulee ehdottomasti välttää.

Jännitysvaihteluvälin ollessa epäsäännöllinen, rakenteelle suunnitellulla käyttöaikana, voidaan rakenteen mitoituksessa huomioida jännitysten vaihteluvälien kertymä. Jännitysvaihteluvälit, joiden arvo on pienempi kuin $0,5 \cdot \Delta f_k / \gamma_m$ voidaan jättää huomioimatta.

Taulukko 27: Aineosavarmuusluvut γ_m (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 32).

Rakenneluokka	γ_m
1	1,6
2	1,4

Väsytytkuormitettu rakenne tulee täyttää seuraava ehto:

$$\Delta\sigma_{ekv} \leq \Delta f_k / \gamma_m$$

jossa

Δf_k on ominaisväsymisraja

γ_m on ainevarmuusluku (taulukko 27)

sekä $\Delta\sigma_{ekv}$ on jännitysten ekvivalentti vaihteluväli, joka voidaan laskea kahdella kaavalla:

$$\Delta\sigma_{ekv} = \left(\frac{\sum_{i=1}^k (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i)}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\Delta\sigma_{ekv} = \psi \cdot \Delta\sigma_{max}$$

$$\psi = \left(\frac{\sum_{i=1}^k (p_i^3 \cdot n_i)}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Kun jännityksen vaihteluvälin suurin arvo $\Delta\sigma_{max} < \Delta f_k / \gamma_m$, väsymiskestävyys on riittävä ja ekvivalenttia jännityksen vaihteluväliä ei tarvitse laskea.

Rakenteen ominaisväsymisraja normaalijännityksen vaihteluvälille lasketaan:

$$\Delta f_k = \left(\frac{C}{5 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

jossa esitetty tekijä C saadaan taulukosta 28.

Taulukko 28: Ominaisväsymisrajat (Suomen rakentamismääräyskokoelma B7: Teräsrakenteet, ohjeet s. 33).

Väsymisluokka $N = 2 \cdot 10^6$	C	Ominais- väsymisraja $[\Delta f_k] = \text{N/mm}^2$ $N = 5 \cdot 10^6$
160	$8,21 \cdot 10^{12}$	118
140	$5,46 \cdot 10^{12}$	103
125	$3,91 \cdot 10^{12}$	92
112	$2,81 \cdot 10^{12}$	82
100	$2,00 \cdot 10^{12}$	74
90	$1,46 \cdot 10^{12}$	66
80	$1,02 \cdot 10^{12}$	59
71	$7,16 \cdot 10^{11}$	52
63	$5,00 \cdot 10^{11}$	46
56	$3,51 \cdot 10^{11}$	41
50	$2,50 \cdot 10^{11}$	37
45	$1,82 \cdot 10^{11}$	33
40	$1,28 \cdot 10^{11}$	29
36	$9,33 \cdot 10^{10}$	26

4. KÄYTETYT OHJELMAT

Työn ensimmäinen vaihe oli selvittää, miten PDMS:llä tehdään putkisillan perusmalli, sekä miten onnistuu teräsrakenteen mallin siirto PDMS:stä Finngen:in. Siirtämiseen oli kaksi vaihtoehtoa. Joko käyttää/tehdä siirtoon tarkoitettu xml tai pml koodipohjainen makro tai löytää tallennusformaatti, jonka molemmat ohjelmat osaavat lukea. Tutkimustyön jälkeen ilmeni, että AVEVA:lla on tarjota PDMS:n lisäosa OpenSteel, joka mahdollistaa talletuksen PDMS-mallista SDNF-formaattiin, jota myös Finngen osaa lukea. OpenSteel on maksullinen lisäosa jota PDMS ei oletuksena sisällä. Lisäosan löytämisen jälkeen voitiin makro-vaihtoehto sivuuttaa, sekä keskittyä OpenSteel lisäosan opetteluun.

4.1 AVEVA

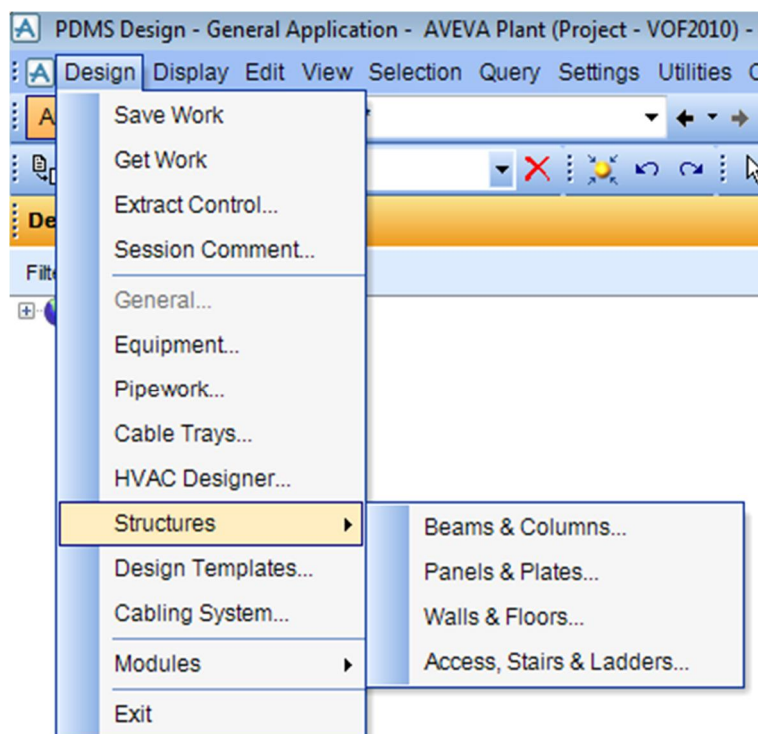
AVEVA, eli entinen CADCentre, on Brittiläinen monikansallinen tietotekniikkayritys, jonka palveluihin ja tuotteisiin kuuluu teknistä suunnittelua, tiedonhallinnan ratkaisuja sekä mallinnus- ja suunnitteluohjelmia eri aloille. Näitä aloja ovat esimerkiksi tehtaات, voimalaitokset ja meriteollisuuden kohteet. Tunnetuin AVEVA:n kehittämä ohjelma on PDMS, joka on yksi käytetyimmistä tehdassuunnitteluohjelmista.

4.1.1 PDMS

PDMS eli Plant Design Management Software on AVEVA:n valmistama ja kehittämä laitosten mallinnus- ja suunnitteluohjelma. PDMS:n yksi vahvimpia puolia on vapaa muokattavuus. PDMS:n voidaan ajaa omia, tai valmiita makroja sekä asettaa näppäimille erilaisia automatisoituja toimintoja. Projektissa voi samanaikaisesti työskennellä useampi suunnittelija ilman, että tämä tuottaisi ongelmia esimerkiksi tallentamisen tai mallien avaamisen kanssa. Johdonmukainen rakennepuu nopeuttaa mallin tekemistä ja muokkaamista. Laaja komponenttikirjasto sisältää useita standardimalleja esimerkiksi rakenneteräksiä, putkistoja, kannakkeita ynnä muita. Mallille on myös mahdollista tehdä törmäystarkastelu sekä konfiguroitava virheentarkistus. PDMS on integroitu muiden AVEVA Plant tuotteiden kanssa, jolloin ohjelmien välinen tietojen vaihto on helppoa, esimerkiksi DRAFT-ohjelmalla voidaan PDMS-mallista tehdä kaksiulotteinen kuva ja työpiirustus.

PDMS:ssä on erilaisia työskentely ”tiloja” (kuva 14.), joissa voidaan mallintaa eri komponentteja tehdaskokonaisuudesta. Näillä tiloilla jokaiselle on määritetty omat työkalut, joita tarvitaan kyseisessä mallin osan luonnissa. Näitä tiloja ovat General, Equipment, Pipework, Cable trays, HVAC Designer ja Structures. Structures sisältää

myös neljä ”alatilaa”, jotka ovat Beams & Columns, Panels & Plates, Walls & Floors ja Access, Stairs & Ladders.



Kuva 15. PDMS:stä löytyvät tilat.

PDMS:n tiloista tärkeimmät ja käytetyimmät ovat General, Equipment, Pipework ja Structures. General-tilassa tehdään yleensä työn pohjustus, kuten rakennepuun teko sekä muiden asetusten asettaminen. Equipment-tilassa voidaan mallintaa tehtaan laitteistoa. Näitä ovat esimerkiksi yksinkertaisemmat pumpput, lämmönvaihtimet tai säiliöt sekä monimutkaisemmat laitteet, kuten reaktoriastiat ja kompressorit. Pipework-tila on tarkoitettu putkien ja putkistojen luontiin. PDMS:ssä putkien mallintaminen on nopeaa interaktiivisten työkalujen avulla. Putken luomisessa voidaan automatisoida peruskomponenttien, kuten laippojen ja tiivisteiden luominen. Venttiilit ynnä muut komponentit voidaan lisätä malliin yksikköinä, joissa kaikki osat on mallinnettu valmiiksi. Structures-tilan alla voidaan luoda teräs- ja betonirakenteita, kuten palkit ja pylväät, lattiat ja seinät ynnä muut. Mallinnus käyttää parametrisoitua ja laajennettavissa olevaa luetteloa profiileista, liitoksista sekä liitososista. Profiililuettelo sisältää kaikki kansainväliset profiilistandardit, myös kulmat ja I-palkit.

4.1.2 OpenSteel

OpenSteel on yksi PDMS:n valmiista makroista ja lisäosista, joka mahdollistaa SDNF-formaatin viennin sekä tuonnin PDMS:ään. Tätä lisäosaa käytetäänkin tässä diplomityössä. OpenSteel vaatii (maksetun) lisenssin toimiakseen.

4.2 FEMdata

FEMdata on suomalainen yritys, joka on erikoistunut FEM-ohjelmien sekä niihin liittyvien palveluiden tarjontaan. Yrityksen pääpainopiste on FEM-ohjelmien kehitys sekä näiden tukipalvelu, koulutus ja myös yrityksen oma laskentapalvelu.

Yrityksen tuottamiin ohjelmiin kuuluu Finngen-mallinnusohjelma, Finnsap-lujuuslaskentaohjelma, Finndraw-jälkikäsittelijä, putkistojen analysointiin tarkoitettu Fpipe sekä paineastia- ja säiliörakenteiden tarkasteluun tarkoitettut erikoisohjelmat. Ohjelmia voidaan käyttää kaikissa MS Windows -ympäristöissä ja käyttökielenä toimii, valinnan mukaan, suomi tai englanti. Ohjelmiin on saatavissa suomen- ja englanninkieliset ohjeet sekä FEMdata:n tukipalvelu.

4.2.1 Finngen

Finngen on mallinnusohjelma, jolla tuotetaan malli Finnsap-lujuuslaskentaohjelmalle laskentaa varten. Finngen:ssä luodaan rakenteen geometria ja elementtimalli sekä annetaan laskennassa tarvittavat ehdot ja tiedot sekä rakenteeseen vaikuttavat voimat. On myös mahdollista tuoda rakenteen geometria toisesta CAD/mallinnusohjelmasta, sillä Finngen tukee yleisimpiä tiedostoformaatteja ja ohjelmakohtaisia liityntöjä esimerkiksi Cadmatic, PDS, PDMS ja Vertex. Kun malli on luotu tai tuotu Finngen:iin, voidaan se tallettaa GRF-formaattiin, joka on luettavissa Finndraw:ssa.

4.2.2 Finnsap

Finnsap on lujuuslaskentaohjelma, jolla voidaan laskea erilaisten teräsrakenteiden ja putkistojen erilaisia kuormituksia. Mallista voidaan tarkastella esimerkiksi statiikkaa, ominaisvärähtelyä, pakkovärähtelyä, stabiilisuutta, materiaalin ja geometrian epälineaarisuutta.

5. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää, miten PDMS:ssä luotu teräsrakennemalli pystyttäisiin siirtämään Finngen -lujuuslaskentaohjelmaan. Työn edetessä selvisi, että PDMS:ää kehittäväällä yrityksellä, Aveva:lla on tarjota PDMS:ään maksullinen lisäosa OpenSteel, jolla tehty rakennemalli voidaan tallentaa SDNF – formaattiin. SDNF on tiedostopääte, jota myös Finngen osaa lukea.

Tämän työn osana on kirjoitettu ohje, jota seuraamalla lukija voi mallintaa teräsrakennemallin PDMS:llä, tuottaa OpenSteel:llä mallista SDNF-tiedoston sekä käsitellä mallia Finngen:ssä. Työssä opastetaan kohta kohdalta jokainen työvaihe, joita seuraamalla mallin tarkastelu onnistuu Finngen:llä. Ohje on esitetty tämän työn lopussa liitteenä

Työssä käytiin läpi Suomessa käytetyt eurokoodit sekä Suomen rakentamismääräyskokoelmat niiltä osin, jotka koskevat putkisillan suunnittelua. SFS:n standardeista tarkasteltiin seuraavia standardeja:

- SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet
- SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt
- SFS-EN 1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuorma
- SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat
- SFS-EN 1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu

Suomen rakentamismääräyskokoelmasta tarkastellaan seuraavia osia:

- B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräykset
- B7: Teräsrakenteet, ohjeet

LÄHTEET

- [1] J. Jaakosela, Diplomityö, Putkisillan lämpöliikkeiden aiheuttaminen voimien määrittäminen siltalohkojen liitoksille ja kiintopisteille, Tampere, 2014, 9 s.
[Viitattu 1.5.2016]
- [2] Sweco, [WWW]. [Viitattu 04.11.2015] Saatavissa:
<http://www.sweco.fi/fi/Finland/>
- [3] Aveva, PDMS [WWW]. [Viitattu 04.11.2015] Saatavissa:
<http://www.aveva.com/>
- [4] FEMdata, FEM tuotteet, [WWW]. [Viitattu 27.11.2015] Saatavissa:
<http://personal.inet.fi/yritys/femdata/>
- [5] Eurokoodi help desk, [WWW]. [Viitattu 15.01.2016] Saatavissa:
<http://www.eurocodes.fi/>
- [6] SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2006, 184 s.
- [7] SFS-EN 1993-1-1 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2005, 99 s.
- [8] SFS-EN 1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuorma, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2004, 79 s.
- [9] SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2011, 254 s.
- [10] SFS-EN 1993-1-8 Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten suunnittelu, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2005, 148 s.
- [11] Ympäristöministeriö, Suomen rakentamismääräyskokoelma [WWW]. [Viitattu 19.02.2016] Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-fi/maankaytto_ja_rakentaminen/lainsaadanto_ja_ohjeet/rakentamismaarayskokoe
lma

LIITTEET

ESIMERKKIRAKENTEN LUONTI

Tässä kappaleessa ohjataan, miten luodaan yksinkertainen teräsrakennemalli PDMS:llä ja tehdään siitä SDNF-malli joka luetaan se Finngen:iin. Tämän jälkeen käydään läpi Finnsap:lla suoritettava laskenta. Lopuksi tehdään graafinen esitys voiman vaikutuksesta malliin Finndraw-ohjelmalla.

PDMS-mallin luominen

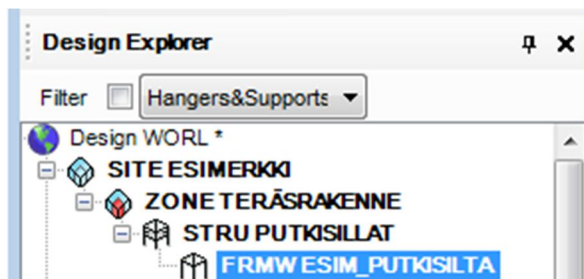
PDMS:ssä mallin tekeminen alkaa aina rakennepuun tai rakennepuun uuden haaran luomisella. Tämä tarkoittaa, että malli tehdään joko jo valmiin rakennepuun alle tai sille tehdään uusi. Oletetaan, että tämä tehtävä esimerkkimalli on uusi kohde, joten sille tulee tehdä uusi haara rakennepuussa. PDMS:llä työskennellessä tulee muistaa ja tarkistaa aina, että oikea kohta rakennepuusta on aktiivisena. Sillä usein voi käydä niin, että väärän kohdan ollessa aktiivinen, malli tallentuu tämän haaran alle ja sen uudelleen löytäminen voi olla hyvinkin hankalaa.

Myös työn tallentaminen tulee tehdä harkiten, sillä paluu-näppäintä ei PDMS:ssä ole, vaan työ palautuu edelliseen tallennukseen. Selitetään tämä esimerkin kautta: Olet tehnyt autonvanteesta mallin ja tallentanut tämän ja nyt aiot tehdä siihen pultin reiät. Teet yhden leikkauksen ja aiot kopioida sen ja huomaat, että vahingossa teit kuusi reikää viiden sijaan. Kun yrität palata tilaan, missä leikkauksen kopiointia ei ole vielä tehnyt, eli painat palaa nappia, PDMS palaakin tilaan, jossa ensimmäistä leikkausta ei ole tehty. Tulee myös ottaa huomioon, että tallenna -painikkeen painaminen estää palaamisen malliin, joka oli ennen tallennustapahtumaa.

Aloitetaan mallin tekeminen rakennepuun luomisella. Kun PDMS on käynnistetty, tulee tarkistaa, mikä tila on ohjelmassa päällä, tämä nähdään Design-valikosta (kuva 14.). PDMS muistaa tilan, jossa on edellisellä kerralla työskennelty. Rakennepuun luomisessa ei ole väärää tilaa, sillä sen voi luoda jokaisessa tilassa.

Create-valikon alta löytyy rakennepuun luomiseen tarvittavat painikkeet. Klikataan Site-painiketta, jolla luodaan oma ”tehdas paikka” World puun alle. Eteen aukeaa Create Site-ikkuna, jossa voidaan omalle site:lle antaa nimi. Tämän jälkeen valitaan luotu site aktiiviseksi ja valitaan Create-valikosta Zone. Zone erottaa site:n sisällä eri kokonaisuuksia, esimerkiksi tehtaassa teräsrakenteet, toimilaitteet, putket jne. Annetaan zone:lle jälleen nimi eteen tulevaan ikkunaan. Zone:n alle voidaan erotella lisää eri kokonaisuuksia Create-valikon alla olevan Structure-painikkeella. Näitä voi olla

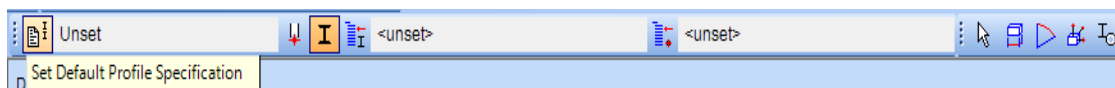
esimerkiksi tehtaan eri kerroksien teräsrakenteet, rappukäytävät, jotka voidaan erottaa toisistaan. Structure:n alle luodaan Framework, jolla voidaan rakennetta pilkkoa vielä pienempiin osiin. Tämän jälkeen on luotuna kuvan 15 mukainen rakennepuu. Tarvittaessa hiiren oikealla painikkeella voi aukaista valikon, mistä löytyy uudelleen nimeämiseen työkalu.



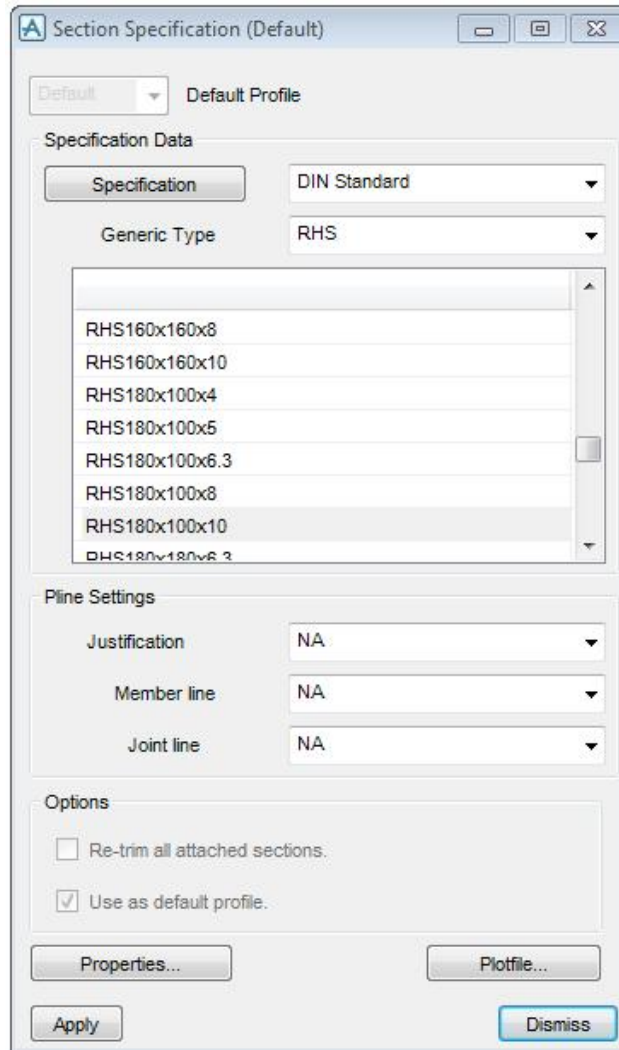
Kuva 16. Rakennepuu

Rakennepuun ollessa kunnossa, on hyvä vaihtaa PDMS:n tilaa. Design-valikon alta valitaan Structures ja sen alta Beams & Columns. Näin saadaan käyttöön oikea tila, jossa voidaan mallintaa teräsrakenteita. Varmistetaan, että tässä tapauksessa rakennepuun FRMW on aktiivisena ja seuraavaksi luotava malli rakentuu oikeaan kohtaan rakennepuussa.

On kaksi tapaa, jolla voidaan mallintaa haluttu teräsprofiili. Voidaan joko tässä vaiheessa valita haluttu profiili, jolloin kaikki seuraavaksi piirrettävät elementit tulevat suoraan valituksi profiiliksi. Profiili valitaan kuvassa 16 näkyvän valikon ensimmäisestä painikkeesta. Tämä avaa Section Specification -ikkunan (kuva 17), jossa on kaikki yleisimmät profiilit tallennettuna. Valinta tulostuu painikkeen viereen, josta voidaan tarkistaa valinta oikeelliseksi. Toinen tapa on mallintaa ensin elementit, jonka jälkeen asetetaan jokaisen elementin ominaisuuksiin eli attribuutteihin profiili erikseen. Tässä esimerkissä käytetään jälkimmäistä tapaa, minkä tekeminen havainnollistetaan tuonnempana.

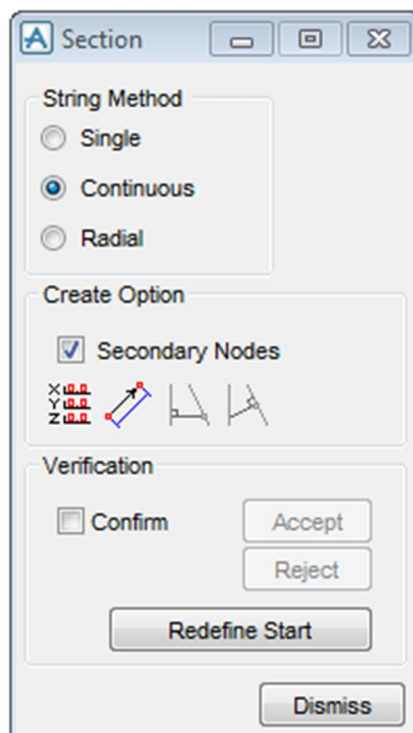


Kuva 17. Teräsprofiiliin hakeminen



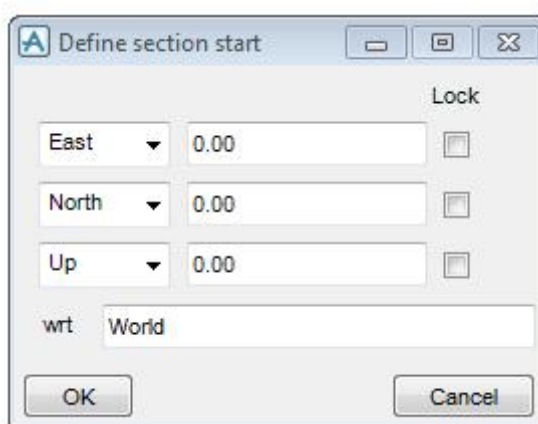
Kuva 18. Teräsprofiilin valinta

Aloitetaan elementtien teko. Create-valikon alta, kohdasta Sections, valitaan vaihtoehto Straight, tämä aukaisee ikkunan (kuten kuvassa 18), jolla voidaan luoda suoria elementtejä. Sections-ikkunasta, String method-kohdasta, voidaan valita, haluaako tehdä yhden elementin vai useamman elementin jonon. Create Option -kohdasta valitaan, miten elementti aloitetaan.



Kuva 19. Suoran elementin luominen

Asetetaan Continuous aktiiviseksi ja valitaan aloituspisteen antotavaksi koordinaatit. Valitsemalla ”Define start/end explicitly” aukeaa Define section start -ikkuna (kuva 19), johon voidaan antaa halutut elementin alkukoordinaatit. Tässä esimerkissä pidetään origon koordinaatit ja aloitetaan elementtien rakentaminen siitä.



Kuva 20. Elementin aloituspisteen anto

Seuraava piste voidaan antaa samalla tavalla koordinaateilla tai ”Define end a given distance and direction from start” -painikkeella. Tällä työkalulla voi antaa seuraavan pisteen edellisen pisteen suhteen. Eli annetaan suunta ja etäisyys, johon elementti luodaan aloituspisteestä. Jokaisen pisteen antamisen jälkeen tulee paina OK, ja valita uudelleen,

millä tavalla seuraavan pisteen haluaa osoittaa (koordinaateilla vai edellisen pisteen suhteen). Taulukossa 29. on esitetty, miten työssä tehtäviä elementtejä on aloitettu mallintaa.

Taulukko 29. Mallin ensimmäiset elementit

	Koordinaatit		
	East	North	Up
Aloituspiste koordinaatteina	0	0	0

Jatketaan elementtien tekoa edellisen pisteen suhteen			
	Suunta	Etäisyys	
	U	6000	
	E	2000	
	D	6000	

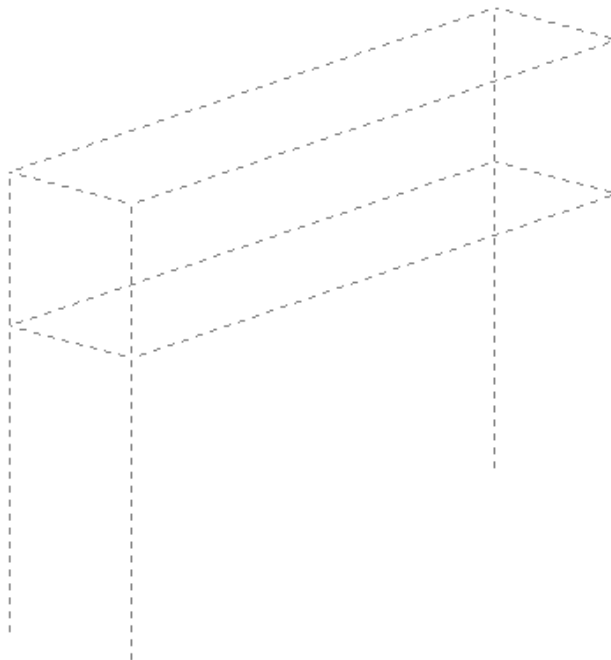
Tämän jälkeen voidaan tehdä uusia elementtijonoja siten, että valitaan String Method-kohdassa ensin Single, PDMS ymmärtää tämän niin, että ei enää jatketa edellistä elementtiä. Uudelle pisteelle annetaan koordinaatit ja vaihdetaan takaisin Continuous, jonka jälkeen jatketaan antamalla joko koordinaatteja tai edellisen pisteen suhteen mitat. Yksittäisiä elementtejä voi luoda, kun pitää Single-kohdan valittuna. Annetaan elementit seuraavan taulukon mukaisesti. Tämän jälkeen tulisi näytöllä olla kuvan 20 mallinen rakenne.

Aloituspiste	Koordinaatit		
	East	North	Up
	0	9000	0

Aloituspisteen suhteen	Suunta	Etäisyys
	U	6000
	E	2000
	D	6000

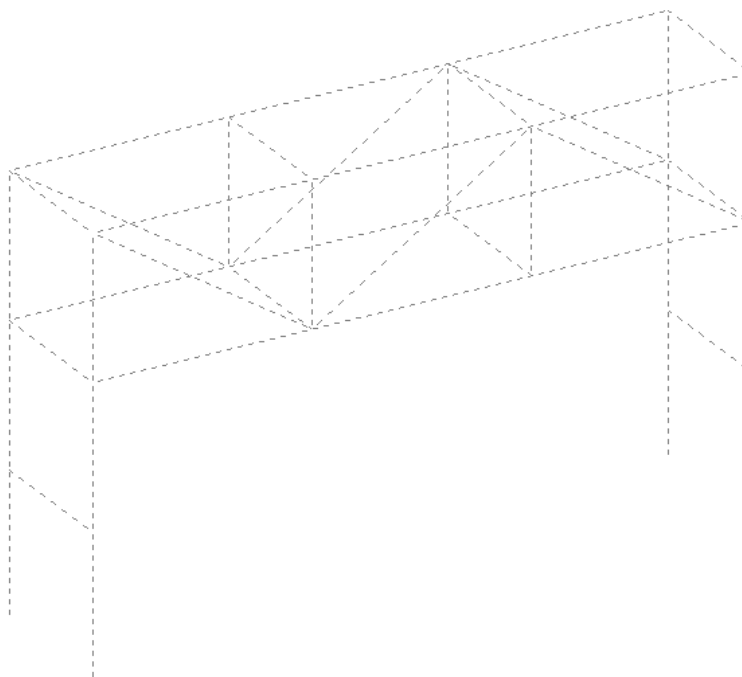
Yksittäisiä elementtejä	Koordinaatit		
	East	North	Up
	0	9000	4000
	Suunta	Etäisyys	
	S	9000	
	Koordinaatit		
	East	North	Up
	0	9000	6000
	Suunta	Etäisyys	

S	9000	
Koordinaatit		
East 2000	North 9000	Up 6000
Suunta S	Etäisyys 9000	
Koordinaatit		
East 2000	North 9000	Up 4000
Suunta S	Etäisyys 9000	



Kuva 21. Rakenteen elementtimalli

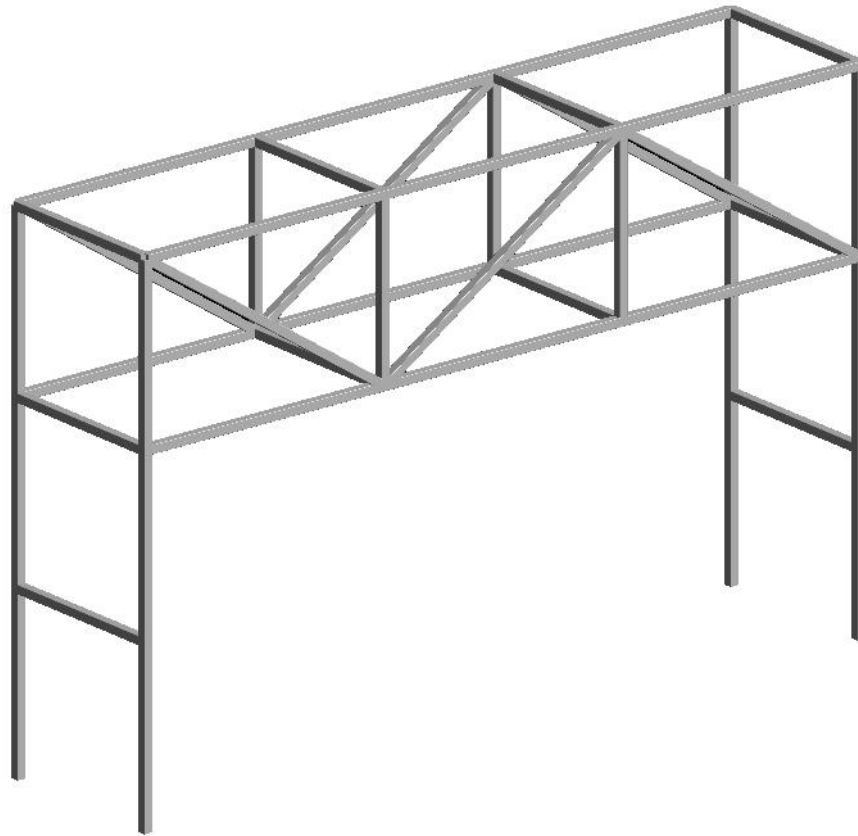
Lisätään rakenteeseen tukirakenteita jo tunnetuilla tavoilla, jotta saadaan kuvan 21 mukainen elementtimalli.



Kuva 22. *Valmis elementtimalli*

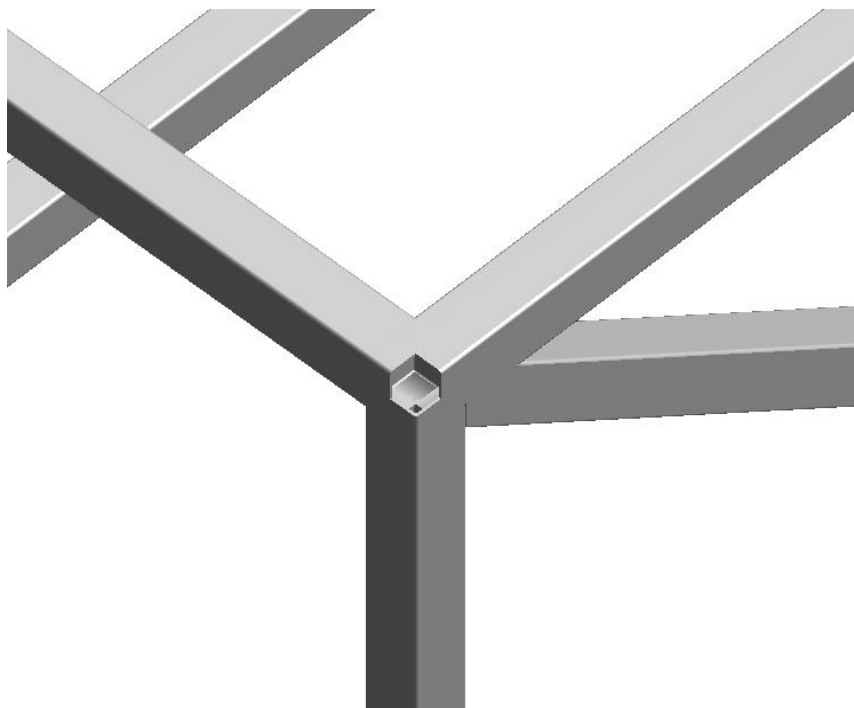
Jos työruudulla ei jo näy komentoikkuna eli Command Window, sen saa näkyviin Display-valikon kohdasta Command Line. Valitaan aktiiviseksi jokin elementeistä ja kirjoitetaan komentoikkunaan komento Q ATT sekä painetaan enter. Tämä komento näyttää elementtiin liittyvät attribuutit. Koska elementille ei ole vielä määrätty profiilia, ei tulostuvassa listassa näy kohtaa Spref. Ensin tulee tarkistaa, että haluttu profiili löytyy PDMS:n kirjastosta. Tämän voi tarkistaa kuvassa 17 osoitetun valikon kautta ilman, että valitsee profiilia lopulta aktiiviseksi.

Kun on päätetty sopiva profiili ja varmistettu, että se löytyy kirjastosta, voidaan elementille määrätä tämä profiili. Valitaan haluttu profiili aktiiviseksi ja kirjoitetaan komentoikkunaan: Spref/DIN-SPEC/RHS100x100x5. Tässä esimerkissä on käytetty RHS 100x100x5 putkea, jolloin komento on tämän näköinen. Komentoa kirjoittaessa tulee muistaa, että Spref-komennon kirjainten koolla ei ole merkitystä, mutta komennon loppuosan tulee olla kirjoitettuna isoilla kirjaimilla, vain profiilin mitan ”kertaa” (x) merkkien tulee olla pieniä kirjaimia. Jos näin ei ole, profiilin asettaminen ei onnistu. Tämä käydään tekemässä jokaiselle profiilille erikseen. Valitaan elementti, kirjoitetaan komentoikkunaan Spref-komento ja painetaan enter. Komennon kirjoittamiselta välttyy siten, että kaksoisklikkaa edellistä Spref-komentoa, joka kopioi edellisen komennon tekstin ja halutessa voi esimerkiksi vaihtaa profiilia. Kun lopuksi on jokaiselle elementille määrätty profiili, on malli kuvassa 22 osoitetun näköinen.



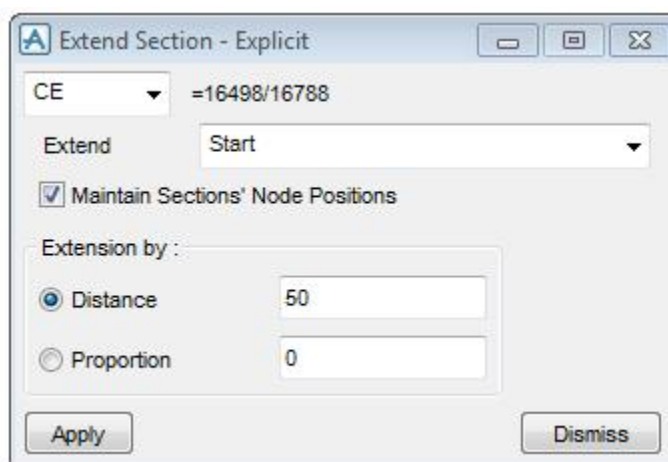
Kuva 23. Profiilien valinta malliin

Esimerkkimalli on näin valmis ja tämän voi muuttaa OpenSteel:iä käyttäen SDNF muotoon ja Finngen osaisi tämän lukea ongelmitta. Mutta kun tarkastellaan palkkien risteymäkohtia, malli ei varsinaisesti ole oikein toteutettu, sillä palkit ovat päällekkäin. Tämä nähdään kuvasta 23.



Kuva 24. Palkkien risteymäkohta aluksi

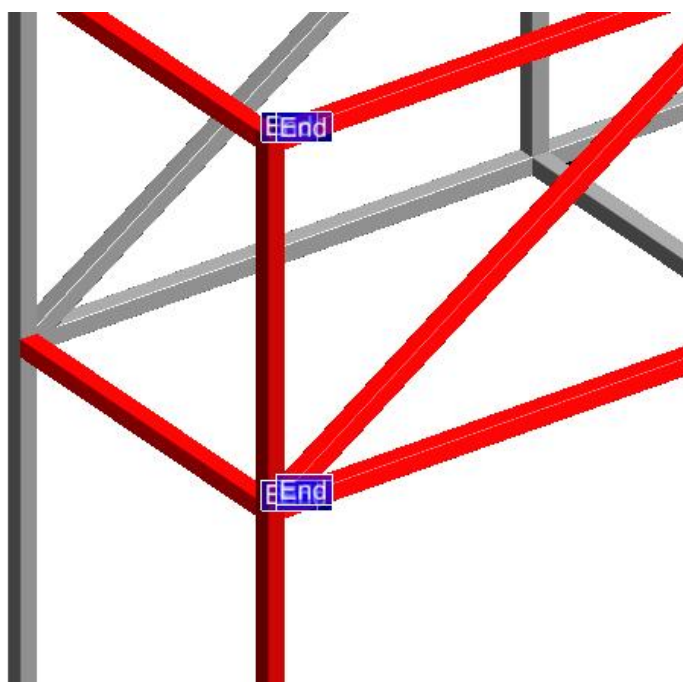
Tämä voidaan korjata seuraavasti. Pystypalkkeja (4 kappaletta, eli rakenteen jokaisessa kulmassa) tulee pidentää tässä tapauksessa 50mm. Tämä tapahtuu Position-valikon alla olevan Extend-kohdan By-komennolla. Avautuvassa Extend Section – Explicit -ikkunassa (kuvassa 24) voidaan muokkaus tehdä jokaiselle palkille. Palkki valitaan aktiiviseksi ja ikkunassa olevaan ylimpään alasvetovalikosta valitaan kohta CE uudelleen. Tämä varmistaa, että haluttu muutos tulee oikeaan palkkiin. Extend-kohdan vetovalikkoon valitaan joka palkin alku eli Start tai loppu End. Se kumpi on kyseisessä palkissa oikea pää, saadaan selville katsomalla työruutua, jossa palkin alku ja loppu on osoitettu. Asetetaan kohta Distance aktiiviseksi ja asetetaan samalla kohdassa olevaan kenttään 50 ja valitaan Apply.



Kuva 25. Palkin pidentäminen

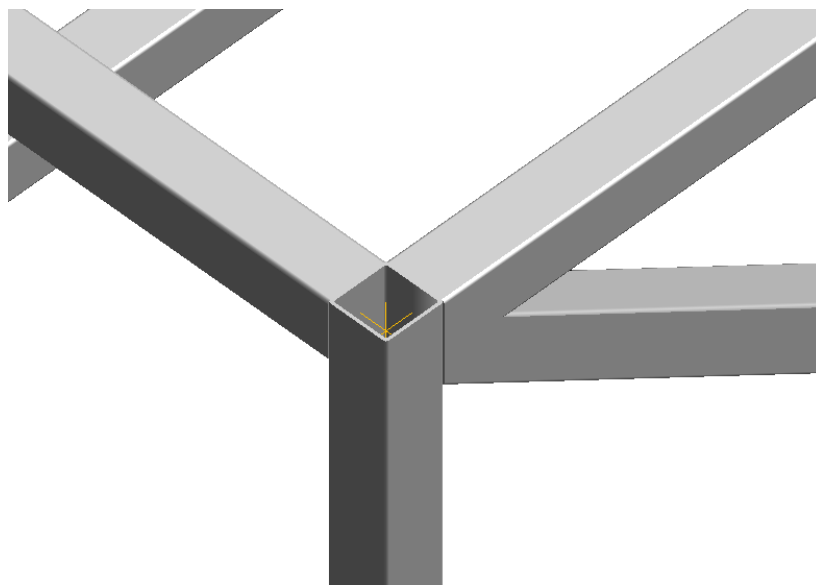
Pystypalkkeihin kiinnittyviä palkkeja ei kuitenkaan voi muokata samalla lailla pidentämällä ja lyhentämällä. Finngen tarvitsee mallista vain profiilin sisällä olevan keskiviivatiedon sekä profiilitiedon. Jos palkkia esimerkiksi lyhennetään Extend-työkalulla, lyhentyy myös keskiviiva. Näin ollen keskiviivat eivät enää leikkaa tai yhdy, jolloin Finngen ei osaa laskea SDNF-tiedostoksi muutetun mallin rasiusta, koska se olettaa elementit erillisiksi palkeiksi.

Pystypalkkeihin liittyvät palkit tulee yhdistää Connect-valikosta löytyvällä Connect-työkalulla, jolla voidaan palkkien elementit yhdistää toisiinsa. Työkalu myös lyhentää palkkia seuraavaan pintaan asti, eli mallinnusteknisesti oikein. Kun työkalu on aktivoitu, tulee hiirellä ensin näyttää palkkia, johon seuraavat palkit yhdistetään. Valittu palkki muuttuu punaiseksi valinnan merkiksi. Tämän jälkeen valitaan palkkien päät, jotka yhdistyvät palkkiin. Tällöin palkit muuttuvat punaisiksi sekä yhdistyvään pätyyn ilmestyy merkintä, onko kyseessä palkin alku- vai loppupää, kuten kuvassa 25.



Kuva 26. Connect työkalun käyttö

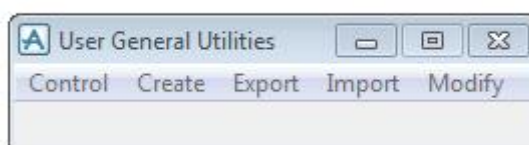
Valinnat hyväksytään Esc-näppäimellä. Malli ei vielä päivity ensimmäisen Esc-painalluksen jälkeen, vaan hyväksyy palkille tehdyn liittämisen ja Connect-työkalu on yhä käytössä, eli yhdistäminen voidaan tehdä myös toiselle pystypalkille. Tämän voi toistaa, kunnes Esc-näppäintä painetaan kaksi kertaa peräjäälkeen, jolloin Connect-työkalu suljetaan ja malli päivittyy. Kun kaikki palkit on yhdistetty, risteymäkohdat ovat malliltaan huomattavasti ”oikeammin” tehty, kuten kuvasta 26 huomataan.



Kuva 27. Palkkien risteymäkohta oikeellisemmin

OpenSteel:n käyttäminen

Jos PDMS:ään on tilattu OpenSteel-lisenssi ja PDMS-administraattori oikeudet omaava henkilö on tehnyt tarvittavat alustukset ja asetukset tietokoneelle, voidaan OpenSteel-työkalua käyttää. OpenSteel toimii vain General-tilassa ja sen löytää Utilities-valikon General-painikkeen alta. Tämä aukaisee OpenSteel-työkalun ikkunan, kuten kuvassa 27. Ikkunan tärkeimmät valikot ovat Export- sekä Import-valikot. Tässä työssä käytetään Export-valikkoa, koska sillä voidaan PDMS-malli muuttaa SDNF-formaatin tiedostoksi.



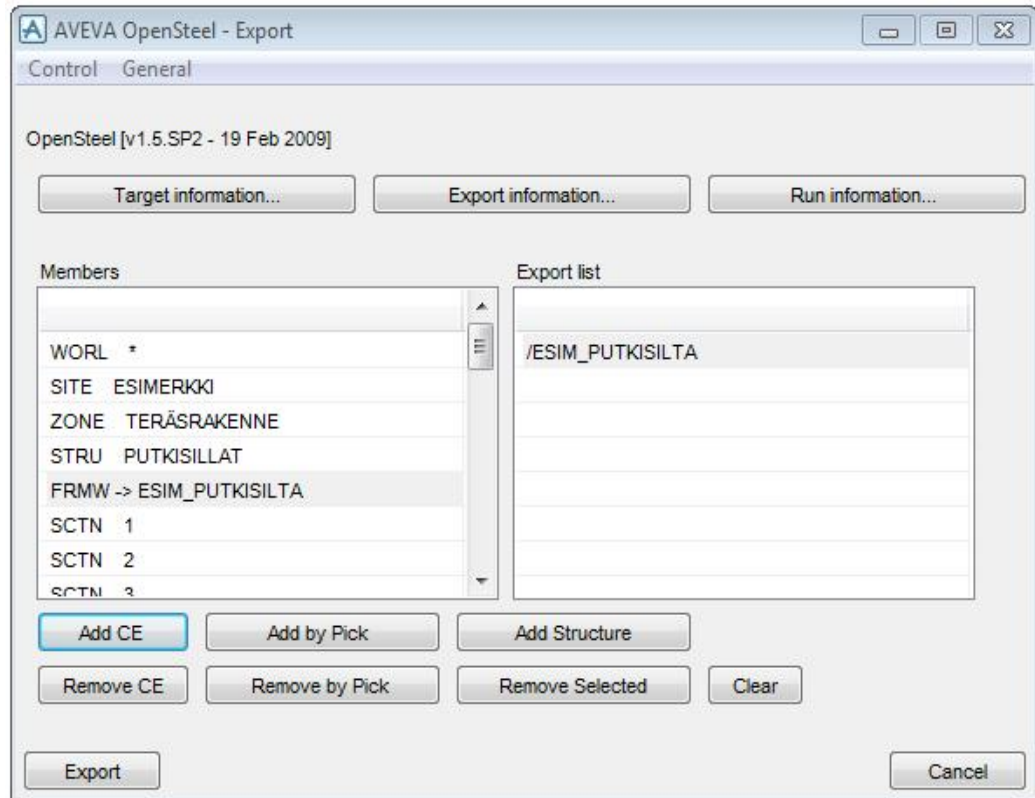
Kuva 28. OpenSteel-työkalu

Export-valikon työkalu on kuvan 28 näköinen ikkuna. Haluttu rakenne voidaan valita ja lisätä näyttämällä joko pääikkunan rakennepuusta tai Export-ikkunan omasta Members-rakennepuusta. Rakenne valitaan painamalla Add CE -painiketta, jolloin valittu kohde kopioituu Export list -tekstikenttään. Tähän voidaan halutessa valita useampikin rakenne. Jos väärä rakenne tulee valituksi, tulee väärä rakenne valita pääikkunan rakennepuusta tai members-rakennepuusta sekä painaa Remove CE -painiketta. Remove CE ei toimi, jos yrittää valita rakennetta suoraan export list -listasta. Tähän on Remove Selected -painike, jolla voidaan valita rakenne tai sen osa, joka halutaan poistaa suoraan export list -listasta.

Add by Pick -painikkeet aktivoivat työkalun, jolla voidaan valita yksittäisiä profiileja pääikkunasta. Tämä vaatii, että ikkunassa on aktiivisena jokin rakenne tai sen osa.

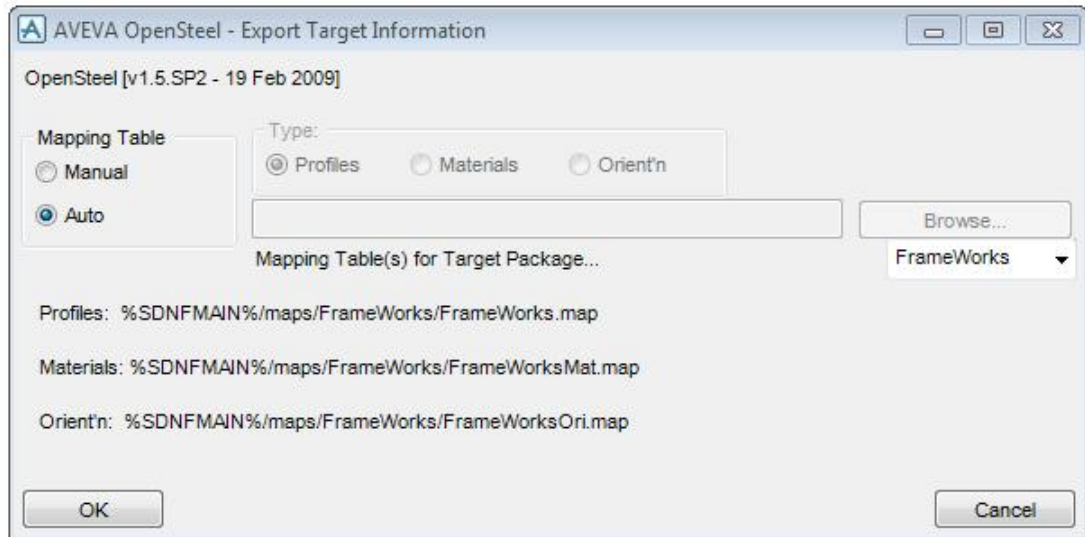
Remove by Pick -painikkeen työkalulla voidaan poistaa profiileja export list -tekstikentästä valitsemalla ne pääikkunasta.

Add Structure lisää export list -listaan valittuna olevan rakenteen koko STRU-osan rakennepuusta, eli kaikki erilliset rakenteet tämän puunhaaran alla tulevat valituksi.



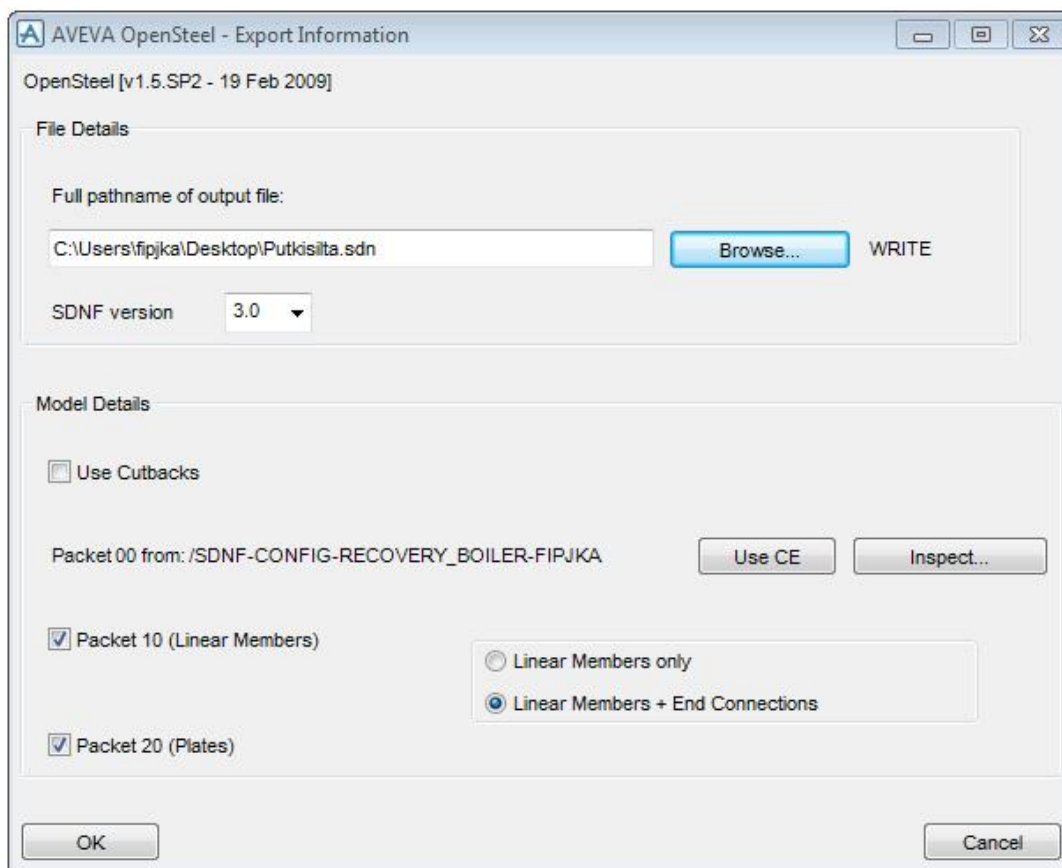
Kuva 29. OpenSteel Export-työkalu

Target information -painikkeella aukeaa ikkuna (kuva 29), josta voidaan valita tulostettavan tiedoston sisältö sekä tiedoston kirjoitusformaatti. Finngen:n tiedostojen tuonti valikosta voidaan valita formaatti TeräsCAD, joten tässä esimerkissä valitaan OpenSteel-formaatiksi SteelCAD.



Kuva 30. Export target information-ikkuna

Export information -painikkeella aukeaa ikkuna (kuva 30), jossa voidaan kertoa muun muassa luotavan SDNF-tiedoston tallennuskansio. Kansion voi kertoa painamalla ensin Browse-painiketta ja tulevaan ikkunaan voidaan hakea haluttu tiedostopolku. File name -kohtaan voi myös kirjoittaa haluttu tiedostonimi tehtävälle tiedostolle, nimen tiedostopäätteeksi tulee kirjoittaa ".sdn". On myös hyvä painaa "Use CE" -painiketta, joka päivittää SDNF-tiedoston otsikko tietueen.



Kuva 31. Export information-ikkuna


Run information -ikkunassa voi halutessaan valita test run, jolla voidaan ensin kokeilla, onnistuuko tiedoston luominen. Voidaan myös valita tulostettavasta tiedostosta tekstitiedosto, jossa valinnasta riippuen lyhyesti tai yksityiskohtaisemmin selitettynä mitä tiedostossa on.

Finngen:ssä muokkaaminen sekä Finnsap laskenta


Tietokoneen kansioista Femdata löytyy tiedosto fgen.exe, joka avaa Finngen:n. Finngen:ssä mallin luominen tai tiedoston lukeminen aloitetaan aina uuden mallin luomisella tai vanhan avaamisella. Uusi malli luodaan ylhäällä olevan Tiedosto-valikon painikkeesta ”Uusi malli”. Eteen aukenevaan ikkunaan valitaan mallin tallennustiedosto ja sen nimi.

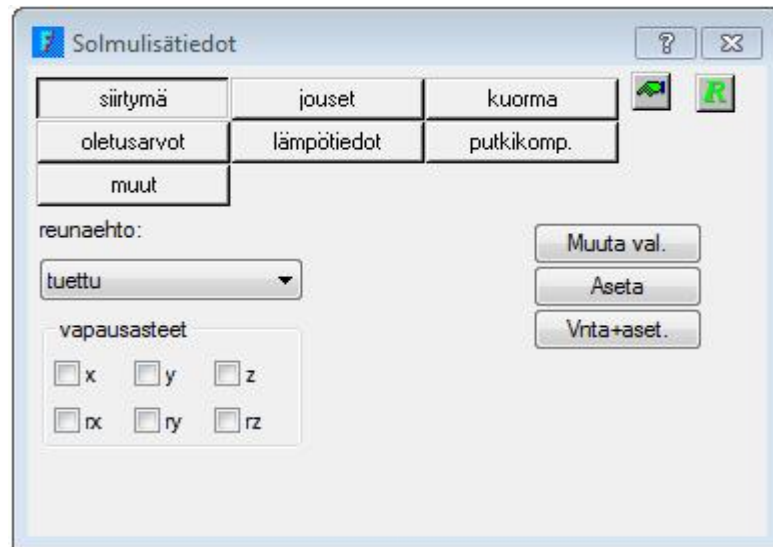
Mallin tuominen Finngen:iin tapahtuu Tiedosto-valikosta löytyvällä Lue malliin -valikon alta. Tässä tapauksessa, kun luetaan PDMS:stä tuotua SDNF-formaatin mallia, valitaan kohta CAD-luku ja sen alta TeräsCAD. Tämä avaa ”TeräsCAD SDNF lukuaset.”-ikkunan. Halutessa ikkunaan voi tehdä muutoksia haluamallaan tavalla, mutta tässä esimerkissä riittää oletusasetukset, yhtä kohtaa lukuun ottamatta. Tällä tarkoitetaan kohtaa Irtopäiden kytkentä. Jos PDMS-mallista ei korjattu profiilien liityntäkohtia, malli tulee oikein oletusasetuksilla, mutta jos liityntäkohdat on ”korjattu”, oletusasetuksilla

malli tulee luetuksi väärin. Korjatuilla liittymillä tulee huomata valita kohta ”Jäykkä kytKentä” valituksi ” Ei kytKentöjä” sijaan. ”Ei kytKentöjä”-asetuksessa tulee profiilin keskiviivojen kohdata siten että elementin pää on kiinni kiinnitettävän elementin keksiviivassa. ”Jäykkä kytKentä” -asetus osaa muodostaa elementtien välille yhteyden, sillä ehdolla, että elementin pään tulee olla kiinni toisen elementin keksiviivassa tai keksiviivojen tulee leikata toisiaan. Tämän jälkeen painetaan ”Lue”-painiketta, joka avaa tiedoston hakuikkunan. Tähän ikkunaan haetaan sijainti, johon PDMS-mallista luotu SDNF-tiedosto on tallennettu.

Kun malli on tuotu, on rakennetta helpompi tarkastella valitsemalla Kuva-valikosta kohta 3D grafiikka. Tällöin on rakennetta mahdollista pyörittää sekä zoomata (nämä tapahtuvat hiiren vasemmalla näppäimellä sekä rullalla). Mallin katselusuuntaa voidaan myös vaihtaa esivalittuihin suuntiin ja projektioihin. Tämä tapahtuu työkalurivissä olevalla Kuvanto (KP) -painikkeella.  Tämä avaa ikkunan, josta voidaan valita isometrisiä projektioita, tasoprojektioita tai muuttaa katselupistettä manuaalisesti numeroita vaihtamalla tekstikenttiin tai vierityspalkkeja liikuttamalla. Työkaluikkunassa on pieni kuutio, joka havainnollistaa aktiivisena olevaa projektiota. Joissakin tapauksissa pääikkunassa tulee kaksoisklikata hiiren vasemmalla painikkeella, katselusuunnan päivittämiseksi.


Seuraavaksi elementit pitää generoida, jotta profiilien tiedot päivittyvät malliin. Tämä tapahtuu Geometria-valikosta löytyvän Elementtien generointi -työkalulla. Esimerkin tapauksessa riittää tässä ikkunassa oletusasetukset, joten voidaan painaa Generoi-painiketta, kirjoittaa ala-vasemmassa olevaan tekstikenttään ”k”, jonka jälkeen painetaan enter.

Finnsap-laskentaohjelma vaatii, että Finngen:ssä mallille tulee ensin asettaa tuennat sekä ulkoiset kuormitukset. Tuennat annetaan solmulisätiedot -työkalulla, joka voidaan avata, joko ylärivin valikosta kohdasta Muokkaa – Solmu – Lisätiedot tai työkalupalkin painikkeella  Solmulisätiedot. Nämä avaavat Solmulisätiedon-valintaikkunan (kuva 31), jossa voidaan solmuille tehdä haluttuja toimintoja.



Kuva 32. *Solmulisätiedot – valintaikkuna*





Esimerkin putkisiltamallille tarvitsee tässä tapauksessa lukita ”jalkojen” siirtymät sekä momentit. Tämä tehdään asettamalla vapausasteet-kohdan jokaiseen ruutuun ruksi. Halutut solmut valitaan painamalla ensin Vnta+aset. -painiketta. Solmujen valitsemiseen on monenlaista tapaa, jota voidaan vaihtaa painamalla hiiren oikeaa painiketta. Tässä tapauksessa on käytetty ID-tapaa, kuten kuvasta 32 voidaan nähdä. ID-valinnalla halutut solmut valitaan yksitellen klikkaamalla. Kun solmut on valittu, valinnat varmistetaan hiiren oikean painikkeella aukaistavasta Valmis-painikkeesta. Jos tuenta tulee valituksi väärin, voi sitä korjata siten, että kuvassa 31 alavetovalikosta, jossa valittuna on Tuettu, valitaan kohta Vapaa. Tällöin valitaan, mitkä vapausasteet halutaan vapauttaa ja valitaan korjattavat solmut, kuten tehtiin tuenta kohdassa.

Kun Finngen-mallista ”poistetaan” jotain, malli ei päivity. Näin ollen malli näyttää visuaalisesti siltä, että esimerkiksi kokonaan poistettu tuenta on yhä paikallaan, vaikka poistaminen on jo varmistettu. Mallin visuaalinen kuva voidaankin päivittää useimmista työkaluikkunoista, oikeasta ylänurkasta, löytyvällä päivitys painikkeella  tai hiiren vasemmalla nappulalla kaksoisklikkaamalla työikkunaa.

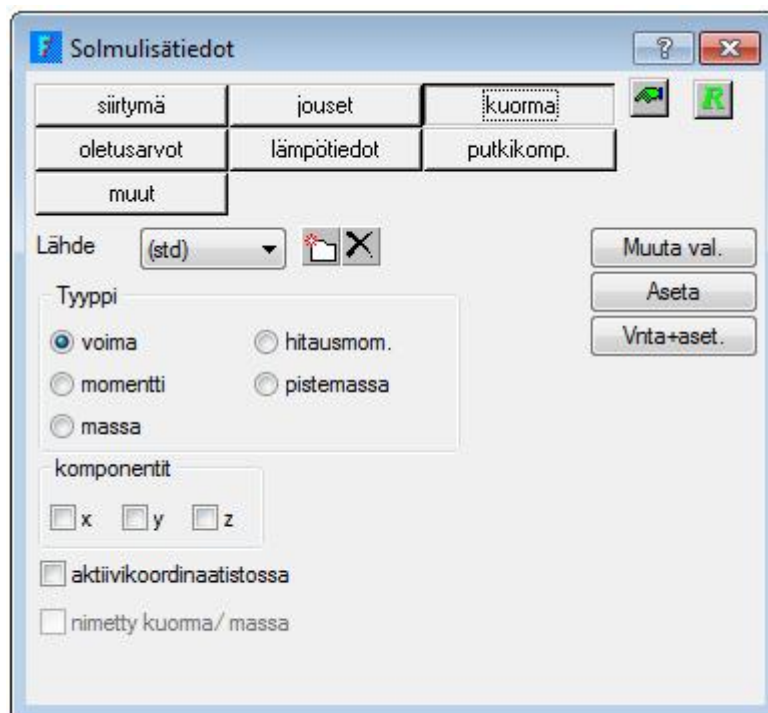
	Valmis
	Peruuta
<input checked="" type="checkbox"/>	ID
	Väli
	Taso
	Suora X/R
	Suora Y/theta
	Suora Z/fii
	Monikulmio
	Jana
	Setti
	Kolmen solmun määrittämästä tasosta
	Kaikki
	Poistomoodi
	Zoomaus *2
	Zoomaus *0.5
	Panorointi

Kuva 33. Valintatyökaluja

Seuraavaksi asetetaan mallille ulkoiset voimat. Voimia voidaan asettaa joko solmukohtaisesti tai elementtikohtaisesti. Finngen:ssä voidaan myös samaan malliin, sekä laskentaan, asettaa useampi erillinen kuormitustapaus, jotka eivät vaikuta toisiinsa.


Kuormitustapausten hallinta tapahtuu yläpalkissa olevalla työkalulla.  KT: 1    Tekstikenttä osoittaa aktiivisena olevan kuormitustapauksen, jota kyseisellä hetkellä muokataan. Tuleekin siis varmistaa, että oikea kuormitustapaus on aktiivisena. Tapauksen vaihtaminen tapahtuu tekstin vieressä olevilla ylös/alas -nuolipainikkeilla. Oletuksena on, että mallissa on vain yksi kuormitustapaus, mutta tapauksia voidaan lisätä sinisellä Lisää kuormitustapaus -painikkeella. Finngen käyttää oletusyksikköinä Newton ja millimetri, tämän voi halutessaan vaihtaa seuraamalla polkua Tiedosto – Laskennan ohjaus – ohjausl. – Asetukset – Yleiset asetukset – Laatu järjestelmä.

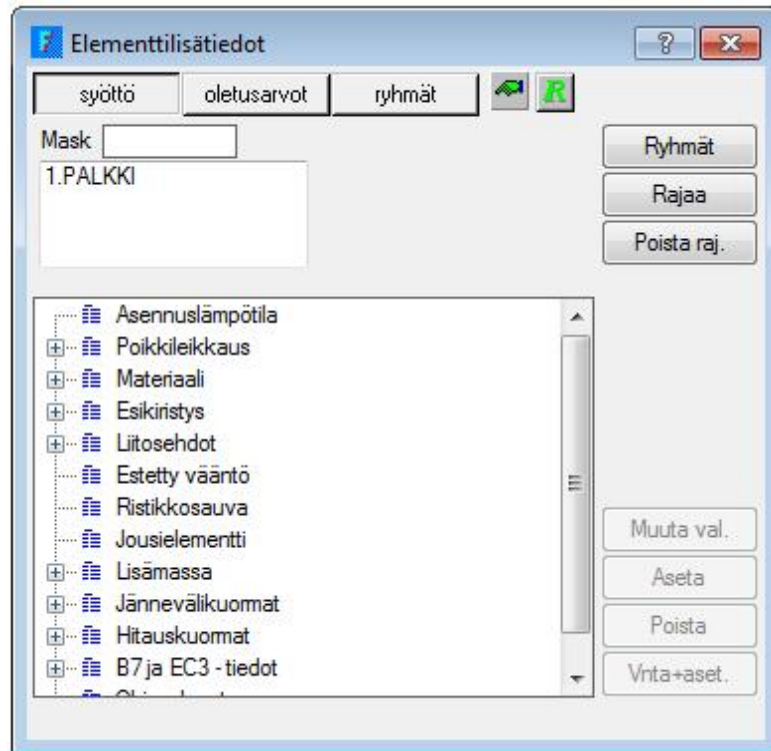
Kuorman lisääminen solmulle tapahtuu aikaisemmin mainitusta Solmulisätiedot-ikkunasta. Ikkunassa olevalla ”kuorma” -painikkeella aukeaa ikkunaan työkalu, josta löytyy solmulle asetettavalle kuormitukselle erilaisia vaihtoehtoja (kuva 33).



Kuva 34. Solmun kuormitus

Ensin valitaan haluttu kuormitustyyppi ja koordinaatiston suunta, johon voima vaikuttaa. Solmun valitseminen tapahtuu samalla tavalla, kuin solmujen kiinnityksessä, eli Vnta+aset. -painikkeella. Valintaan on samat työkalut ja tavat, sillä erolla, kun on valittu hiiren oikean näppäimen valikosta ”Valmis”, tulee vasemman alakulman teksti-ikkunaan antaa vaikuttavan voiman suuruus Newtonina.

Jos elementille haluaa lisätä esimerkiksi viivakuormaa tai pistevoima haluttuun kohtaan elementin keskelle, tämä voidaan lisätä työkalurivistä löytyvällä  elementtilisätiedot-painikkeella. Tämä aukaisee kuvan 34 mukaisen ikkunan, jossa löytyy elementtiin liittyviä tietoja sekä elementille annettavia parametreja. Kohdasta Jännevälikuormat voi löytää työkalut elementille asetettaville kuormille. Viivakuormaa (kuva 35) annettaessa tulee huomata antaa kuorman elementtiin vaikuttava suunta. Tämä annetaan aukeavan työkalun Suunta-optiosta, jossa oletuksena lukee GLOB X. Tämä tarkoittaa, että kuorma vaikuttaa globaalin koordinaatiston positiiviseen x-suuntaan. Jos haluaa, että kuorma on negatiiviseen suuntaan, tulee kuorman arvo antaa negatiivisena. Viivakuorman arvo annetaan kohtiin Viivakuorma Q1 sekä Viivakuorma Q2. Näihin annetaan kuorma yksiköllä N/mm. Tulee huomioida, että jos kuorman arvo annetaan vain toiseen teksti-ikkunoista, viivakuorma muodostuu kolmion muotoiseksi, eli toisessa päässä elementtiä on asetettu kuorman arvo, joka pienenee lineaarisesti, kunnes se saavuttaa nollan elementin toisessa päässä.



Kuva 35. Elementtilisätiedot

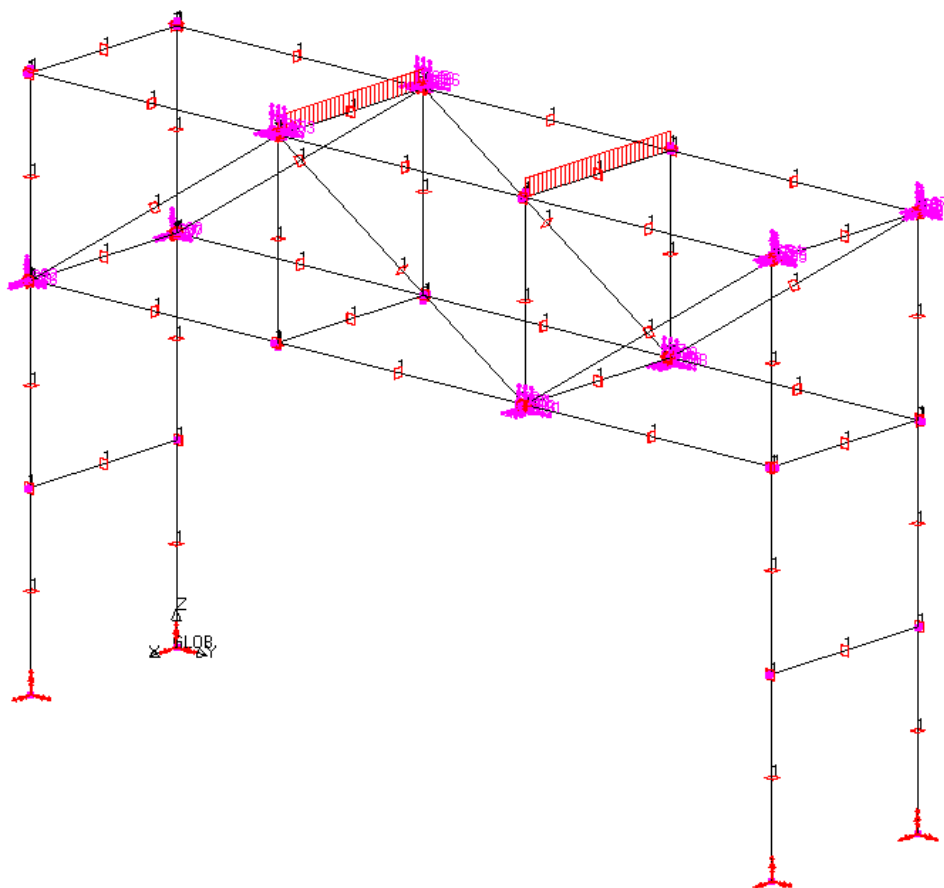
Sijoittelutapa	= elementeille
Suunta	= GLOB X
Viivakuorma Q1	= 10.0
Viivakuorma Q2	= 10.0
Etäisyys alkus. DIST1	= 0.0
Kuorma-al. pit. DIST2	= 0.0
Viivakuorma	= 0.0
Alkuarvo viivakuorma	= 0.0
Loppuarvo viivakuorma	= 0.0
Viivak. p.arvo f0	= 0.0
Viivak. grad. df/dx	= 0.0
Viivak. grad. df/dy	= 0.0
Viivak. grad. df/dz	= 0.0
Pp. koord. P0x P0y P0z	= 0.0/ 0.0/ 0.0

Kuva 36. Viivakuorma

Elementin valinta tapahtuu samalla tavalla, kuin kuorman asettaminen solmulle, eli Vnta+aset. -painikkeella. Valitaan haluttu elementti/elementit ja valitaan hiiren oikealla näppäimellä aukeavasta valikosta Aseta. Tässä esimerkissä luodulle mallille asetetaan kaksi viivakuormaa kuten kuvassa 36.

Kun halutut tuennat sekä kuormitukset on asetettu, talletetaan mallista laskentatiedosto (.dat) sekä ajetaan laskentaohjelma Finnsap. Tämä tapahtuu tiedosto-valikon alta löytyvällä painikkeella ”Tallenna laskentatiedosto (.dat) + aja laskentaohjelma”. Tämä

tekee mallista Finnngen:llä luettavan tiedoston (.rst), listatiedoston (.lis), joka sisältää mallin lähtötiedot, elementtivoimat ja -momentit, elementin jännitykset sekä solmusiirtymät ja -kiertymät. Myös Finndraw:n tarvitsema grf-tiedosto tallettuu mallin kansioon. Näin ollen malli on valmis, ja voidaan avata Finndraw sekä aloittaa työskentely sillä.



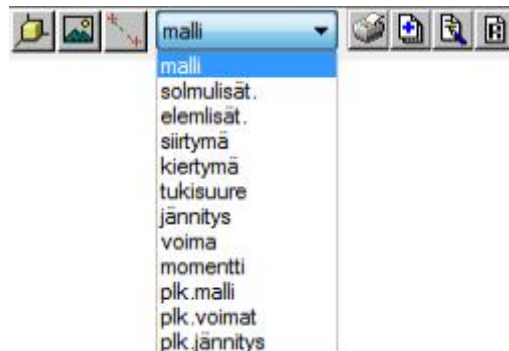
Kuva 37. Viivakuormitus esimerkki tapauksessa

Finndraw jälkikäsittely

Finndraw löytyy Femdata kansion alta nimellä fdragui.exe. Tämä avaa tyhjän Finndraw ikkunan, johon aukaistaan edellä tehdyn esimerkkimallin grf-tiedosto ylävalikosta kohdasta Tiedosto – Avaa malli. Myös tässä mallin tarkastelua helpottaa, kun asetetaan Kuva-valikosta kohta 3D grafiikka aktiiviseksi.

Kun grf-tiedosto on avattu, ikkunaan avautuu yksinkertainen malli rakenteesta. Tulee varmistaa, että oikea kuormitustapaus on aktiivisena, työkalupalkissa olevassa Kuormitustapaus-kentässä.

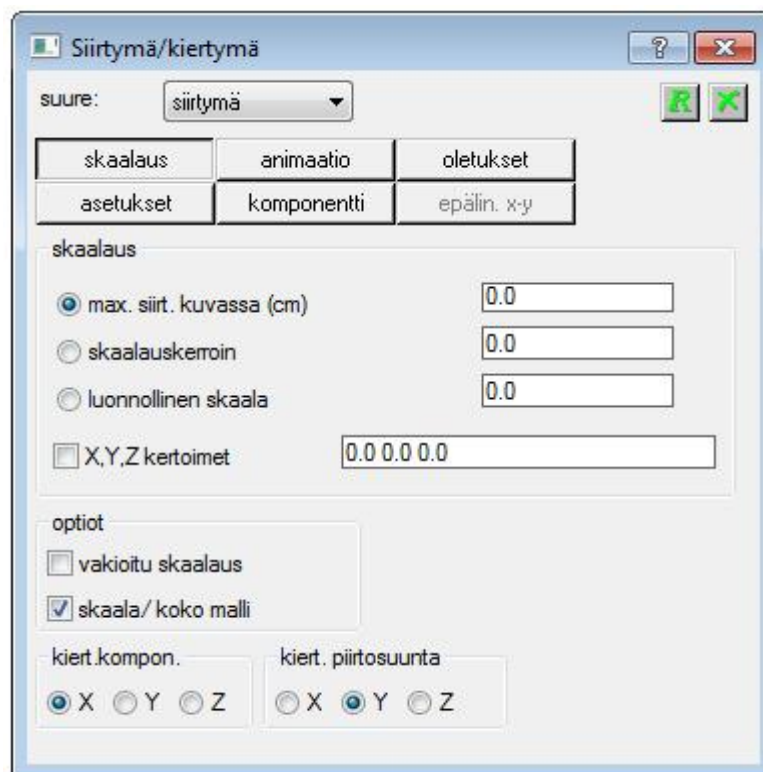
Työkalurivissä on alasvetovalikko, joka toimii pikatyökaluna erilaisten tulosten tarkastelemisessa (kuva 37). Tämä toimi siten, että haluttu tulos valitaan valikosta, jonka jälkeen kaksoisklikataan pääikkunassa kuvan päivittämiseksi.



Kuva 38: Tulosten tarkastelemisen pikatyökalu

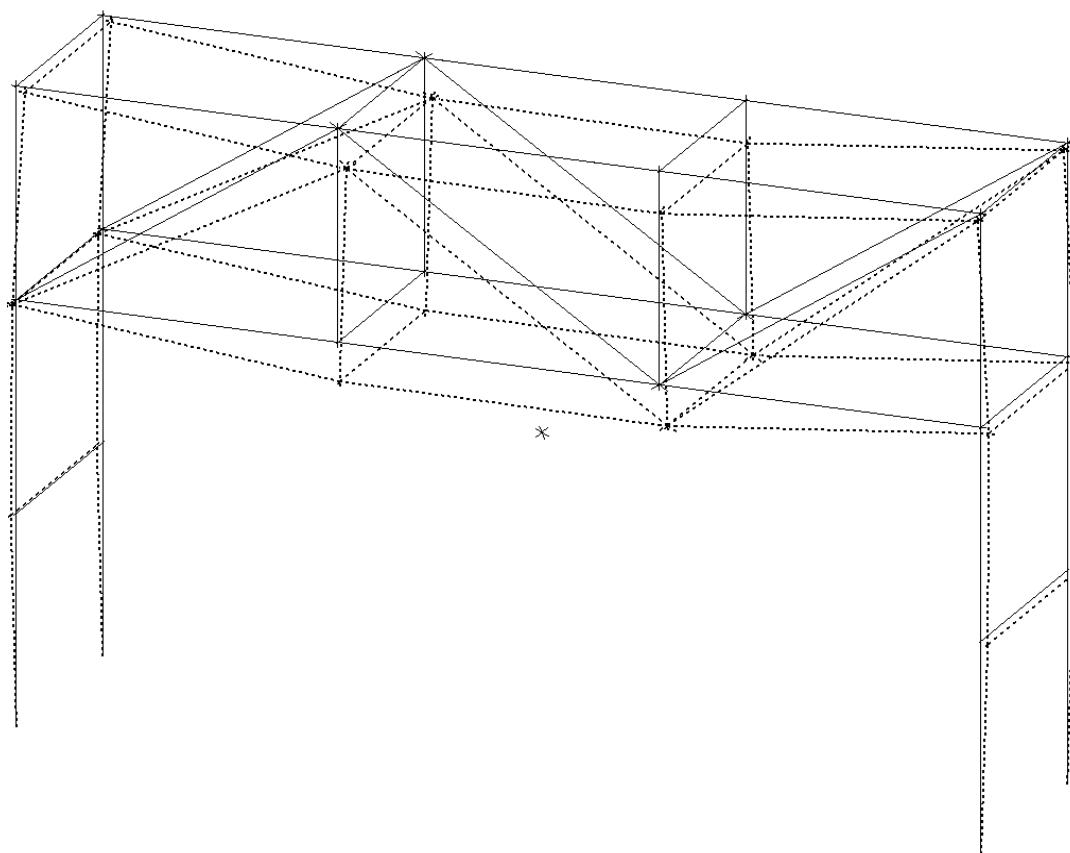
Jos pikatyökalusta löytyvät tulokset eivät ole riittävän kattavat, tai haluttua tulosta ei siinä ole, voidaan tuloksien tulostamiseen käyttää eri tapauksille tarkoitettuja työkaluja.

Mallista voidaan tarkastella siirtymäkuva, jonka luomiseen tarvittava työkaluikkuna (kuva 38) voidaan avata valitsemalla työkalupalkin Siirtymä / kiertymä -painikkeella, tai kun työikkuna on aktiivisena painamalla näppäimistön s-painiketta.

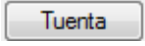


Kuva 39: Siirtymä/kiertymä työkalu

Työkalun oletusasetuksilla mallista saadaan tuotettua siirtymäkuva, jossa siirtymät ovat liioitellusti havainnollistettu, kuten kuvassa 39. Tämä johtuu siitä, että aktiivisena on ”max. siirt. kuvassa” -kohta. Jos kuvasta halutaan nähdä oikeat siirtymät graafisesti, tulee valita kohta ”luonnollinen skaala” aktiiviseksi, sekä päivittää kuva. Pääikkunan alalaidassa on kerrottu koordinaattien suunnassa minimi- ja maksimisiirtymä millimetreinä. Halutessaan voidaan tarkastella jokaisen solmun siirtymää lukuina, poistamalla valikkorivin Tulosesitys-alasvetovalikosta ”siirtymät deformaatiokuvana” -kohdassa oleva valinta. Oletuksena siirtymät esitetään Z-koordinaattiakselin suuntaisesti, halutessaan voidaan suunta vaihtaa Siirtymä/kiertymä -työkaluikkunan komponentti -sivulta.

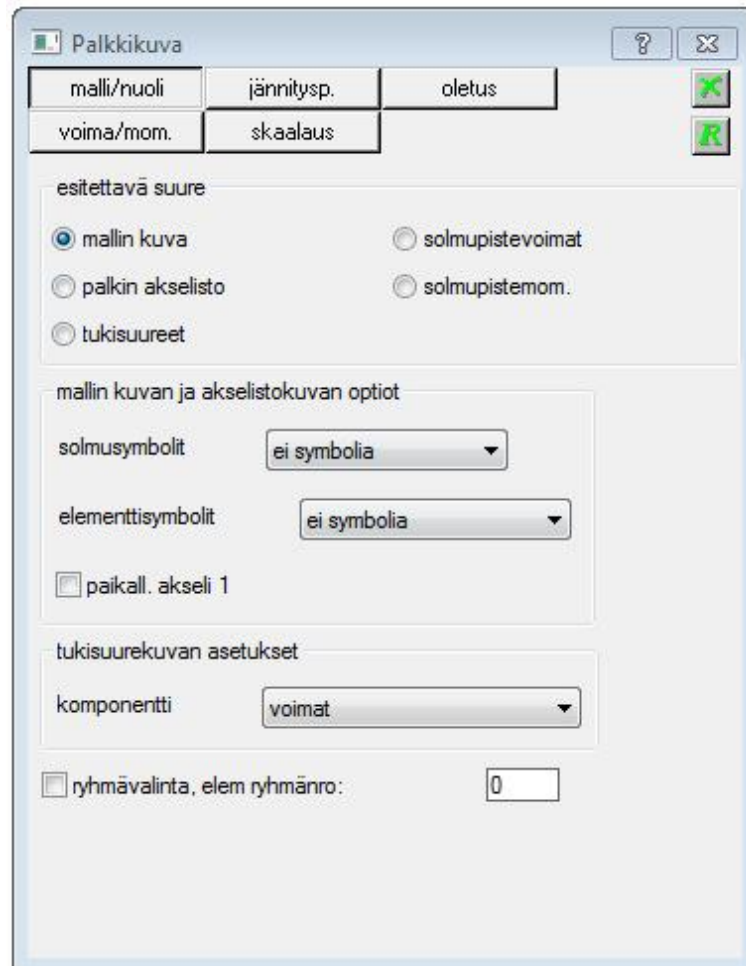


Kuva 40: Siirtymäkuva liioitelluilla siirtymillä

Halutessa voidaan tarkastella tuettuihin solmuihin vaikuttavia tukivoimia. Tähän tarkoitettu työkalu aukeaa työkalurivin Tuenta-painikkeella . Työkalun oletusasetus antaa tuettujen solmujen tukivoimat koordinaattiakselien suunnassa kilonewtoneina (kN). Työkalulla voidaan myös selvittää esimerkiksi tukimomentit, siirtymät ja kiertymät.

Mallista voidaan luoda palkkikuvia Palkki-painikkeen alta löytyvällä Palkkikuva-ikkunan (kuva 40) työkaluilla. Ikkunassa olevan jännitysp. -sivulla voidaan tarkastella palkkeihin kohdistuvia jännityksiä. Valittavana on useampi erilainen piirrettävä jännitys, esimerkiksi

kun sig2 on aktiivisena, piirtyy ikkunaan viivakuorman aiheuttama jännitys sen vaikuttamiin palkkeihin.



Kuva 41: Palkkikuvien luonti työkalu

Esitys-painikkeella avautuvalla Esitys/tulokset -työkalulla voidaan piirrettäviä tuloksia muokata ja lisätä, kuten esimerkiksi solmupisteiden jännitykset.

Halutessaan voi mallista rajata tarkasteltavaksi haluttu elementti tai osa rakenteesta. Tämä tapahtuu pääikkunassa painamalla hiiren oikeanpuoleista painiketta, joka avaa ponnahdusvalikon. Valikosta löytyy kaksi työkalua, joilla voidaan rajata valintaa halutulla tavalla. Rajaa suorakaidealueilla (RE) -työkalulla voidaan näyttää mallista suorakaiteen muotoinen alue/alueita, jotka valitsevat rakenteesta ne elementit, joiden keksipiste jää suorakaiteen sisään. Monikulmiorajaus (RP) -työkalulla voidaan piirtää yksi tai useampi monikulmio, joka rajaa mallista halutut elementit. Kun alue/alueet on piirretty, kuva päivittyy hiiren oikeanpuoleisella painikkeella. Tämän jälkeen elementeille voidaan tehdä samat toiminnot, kuin koko mallille. Elementtien

rajaaminen, eli rakenteen palauttaminen kokonaiseksi, tapahtuu ponnahdusvalikon komennolla Poista RE- ja RP- rajausta.